



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**ANALÝZA SPALIN PŘI SPALOVÁNÍ AGROPELET V
AUTOMATICKÝCH KOTLÍCH PRO DOMÁCNOST**

ANALYSIS OF FLUE GAS IN AUTOMATIC DOMESTIC BOILERS FOR AGROPELET

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Minář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Jecha, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Marek Minář
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. David Jecha, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza spalín při spalování agropelet v automatických kotlích pro domácnost

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce bude stanovit základní palivové charakteristiky paliva z agropelet se a porovnání výsledků s publikovanými výsledky. Dále se věnovat podmínkám spalování agropelet s důrazem na tvorbu plyných emisí a emisí TZL.

Cíle bakalářské práce:

- provést rešerži vlastností agropelet jako paliva
- provést rešerži spalování agropelet se zaměřením na tvorbu TZL
- experimentálně stanovit vlastnosti vybraných paliv a ověřit tvorbu emisí TZL na pilotní jednotce

Seznam doporučené literatury

BUDAJ: Tepelný výpočet kotle, VUT Brno 1983

BALÁŠ, M.: Kotle a výměníky tepla, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3955-9

DLOUHÝ, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80-01-03757-7

JANDAČKA, J. a kol.: Biomasa ako zdroj energie. Žilina 2008, ISBN 978-80-969161-3-9

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je analýza spalín při spalování agropelet v automatických kotlích pro domácnost. Důraz je kladen na popis biomasy jako paliva, způsoby využití biomasy k energetickým účelům, úpravu biomasy, výrobu a vlastnosti alternativních pelet, automatické kotle a hořáky pro spalování specifických druhů paliv. Konec teoretické části je zaměřen na normy a předpisy pro provoz kotlů. Praktická část ověřuje tvorbu emisí na malých zdrojích znečištění a stanovuje koncentraci tuhých a plyných znečišťujících látek. Konec praktické části se zabývá porovnáním výsledků s legislativními požadavky a výpočtem účinnosti kotle.

Klíčová slova

agropelety, paliva, dřevní pelety, kotle, účinnost kotle, emise TZL, spaliny, plyné emise

Abstract

The objective of the presented bachelor thesis is flue gas analysis during combustion of agropellets in automatic household boilers. Emphasis is placed on the description of biomass as a fuel, the ways of using biomass for energy purposes, alterations of biomass, production and properties of alternative pellets, automatic boilers and burners for combustion of specific fuel types. The end of the theoretical part is focused on standards and regulations for boiler operation. The practical part verifies the formation of emission on small sources of pollution and determines the concentration of solid and gaseous pollutants. The end of the practical part pursues with comparison of results with legislative requirements and calculation of boiler efficiency.

Key words

agropellets, fuels, wood pellets, boilers, boiler efficiency, PM emissions, exhaust gases, gas emissions

Bibliografická citace

MINÁŘ, Marek. Analýza spalín při spalování agropelet v automatických kotlích pro domácnost [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117042>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce David Jecha.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Analýza spalin při spalování agropelet v automatických kotlích pro domácnost“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Davida Jechy, Ph.D. a uvedl jsem v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne: 23. 5. 2019

Podpis:

Poděkování

Děkuji odbornému vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Jechovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a nasměrování při psaní této bakalářské práce.

Obsah

Úvod	17
1. Zdroje tepla pro vytápění rodinného domu	18
2. Paliva	19
2.1. Složení paliv	19
2.1.1. Hrubý rozbor	19
2.1.2. Prvkový rozbor	21
2.1.3. Celkové složení paliva	21
2.2. Vlastnosti paliv	22
2.2.1. Fyzikální a chemické vlastnosti	22
2.2.2. Energetické vlastnosti	23
2.2.3. Pyrotechnické vlastnosti	23
2.2.4. Spalovací vlastnosti	24
3. Rozdělení paliv	25
4. Rozdělení paliv dle skupenství	26
4.1. Kapalná paliva	26
4.1.1. Charakteristické vlastnosti kapalných paliv	26
4.2. Plynná paliva	27
4.2.1. Charakteristické vlastnosti plyných paliv	28
5. Rozdělení paliv dle původu	29
5.1. Fosilní paliva	29
5.2. Obnovitelná paliva	30
5.3. Odpadní paliva	30
6. Tuhá paliva	32
6.1. Uhlí	33
6.2. Umělá uhelnatá paliva	34

6.3.	Dřevo	35
6.4.	Vlastnosti tuhých paliv	36
6.4.1.	Spalné teplo.....	37
6.4.2.	Výhřevnost.....	37
6.4.3.	Obsah síry v palivu	38
6.4.4.	Charakteristické vlastnosti nepoužívanějších tuhých paliv	39
7.	Biomasa.....	41
7.1.	Rozdělení biomasy	41
7.2.	Způsoby využití biomasy k energetickým účelům	42
7.3.	Mechanické úpravy biomasy	42
7.4.	Mechanické úpravy tuhé biomasy	43
7.4.1.	Peletování.....	43
7.4.2.	Briketování.....	44
7.5.	Pelety z biomasy	44
7.6.	Dřevní pelety	45
7.7.	Alternativní pelety	47
7.7.1.	Energetické rostliny	48
7.7.2.	Obiloviny a olejnin	49
8.	Kotle.....	50
8.1.	Hlavní konstrukční části kotle	50
8.2.	Roztřídění kotlů na tuhá paliva do základních kategorií	52
8.3.	Typy hořáků pro automatické kotle.....	55
8.3.1.	Univerzální samočistící hořák od firmy Kovarson	55
8.3.2.	Retortový hořák od firmy Kovarson	56
8.3.3.	Univerzální čtvercový hořák od firmy Kovarson	56
8.3.4.	Hořák s pohyblivými deskami od firmy Verner	57

8.3.5.	Rotační hořák Blaze Harmony	58
8.4.	Výměníková část kotle	59
8.4.1.	Rozdělení a typy výměníků	59
9.	Normy a předpisy pro provoz kotlů.....	60
9.1.	Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší	60
9.2.	Norma ČSN EN 303-5	61
9.3.	Směrnice o Ekodesignu 2009/125/ES	62
10.	Měření emisí na malých zdrojích znečištění	63
10.1.	Stanovení koncentrace tuhých a plyných znečišťujících látek.....	64
10.1.1.	Příprava před měřením	67
10.1.2.	Průběh měření	68
10.1.3.	Přepočet na referenční kyslík.....	68
10.2.	Vyhodnocení měření 1	69
10.3.	Vyhodnocení měření 2	70
11.	Porovnání výsledků dřevních pelet s agropalivem 1	73
11.1.	Porovnání výsledků měření 1	73
11.2.	Porovnání výsledků měření 2.....	75
12.	Vyhodnocení výsledků	78
13.	Metody výpočtu účinnosti kotle	80
13.1.	Přímá metoda	80
13.2.	Nepřímá metoda	80
13.2.1.	Ztráta mechanickým nedopalem.....	81
13.2.2.	Ztráta chemickým nedopalem.....	81
13.2.3.	Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí.....	82
13.2.4.	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	82
13.2.5.	Ztráta citelným teplem spalín	83

14.	Výpočet účinnosti kotle 1 pro agropalivo 1	84
14.1.	Vstupní hodnoty pro výpočet	84
14.2.	Rozbor agropaliva 1.....	84
14.3.	Výpočet přímou metodou	85
14.4.	Výpočet nepřímou metodou	85
14.4.1.	Ztráta mechanickým nedopalem	85
14.4.2.	Ztráta chemickým nedopalem	85
14.4.3.	Ztráta sáláním a vedením tepla	86
14.4.4.	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	86
14.4.5.	Ztráta citelným teplem spalin.....	86
14.4.6.	Účinnost kotle nepřímou metodou	86
15.	Závěr	87
	Seznam použitých zdrojů.....	89
	Seznam použitých obrázků	96
	Seznam použitých tabulek	98
	Seznam použitých grafů	100
	Seznam použitých symbolů	101
	Seznam zkratk	104

Úvod

Cílem této bakalářské práce je analýza spalin při spalování agropelet v automatických kotlích pro domácnost. Teoretická část přibližuje zdroje tepla pro vytápění rodinného domu, specifické vlastnosti a rozdělení paliv pro vytápění, typy kotlů a legislativní požadavky pro jejich provozování. Důraz je kladen na popis biomasy jako paliva, způsoby využití biomasy k energetickým účelům, úpravu biomasy, výrobu a vlastnosti alternativních pelet, automatické kotle a hořáky pro spalování specifických druhů paliv. Konec teoretické části je zaměřen na normy a předpisy pro provoz kotlů, se kterými se budou srovnávat výsledky z praktické části práce.

Praktická část ověřuje tvorbu emisí na malých zdrojích znečištění a stanovuje koncentraci tuhých a plyných znečišťujících látek při spalování agropelet. Z plyných znečišťujících látek se zaměříme na oxid uhelnatý, oxidy dusíku a celkový organický uhlík. Konec praktické části práce porovnává výsledky měření s legislativními požadavky a tvorbou emisí při spalování dřevních pelet a zabývá se výpočtem účinnosti kotle použitým při měření.

1. Zdroje tepla pro vytápění rodinného domu

Zdrojů pro vytápění rodinného domu existuje nepřeberné množství. Volba druhu vytápění závisí na specifických vlastnostech a typu rodinného domu či budovy, ve které bude vytápění použito. Nejčastější zdroje vytápění rodinných domů jsou [1]:

- Elektřina
- Plyn
- Tuhá paliva
- Tepelné čerpadlo

Vytápění elektřinou je nejvýhodnější pro domy s malou spotřebou energie, např. pro nízkoenergetické budovy z důvodu vyšších provozních nákladů. Vytápění plynem je velmi šetrné k životnímu prostředí a je vhodné do všech budov, které jsou napojeny na plynovou přípojku. Vytápění tuhými palivy je stále nejrozšířenější zdroj tepla pro rodinné domy z důvodu jednoduchosti a levnějšího provozu. Nejrozšířenějším alternativním zdrojem vytápění je tepelné čerpadlo. Tepelná čerpadla neprodukují žádné emise. Provozní náklady jsou minimální, avšak pořizovací cena tepelného čerpadla je velmi vysoká [1].

Nás však v této práci nejvíce bude zajímat vytápění tuhými palivy z důvodu použití automatického kotle na tuhá paliva v experimentální části práce. Základní dělení kotlů je dělení dle použitého paliva, a proto se rozeznávají celkem 4 druhy kotlů [2]:

- Kotle na tuhá paliva – fosilní paliva, biomasa, tuhé odpady
- Kotle na kapalná paliva – topné oleje a kapalné odpady
- Kotle na plynná paliva – zemní plyn, umělé plyny a plynné odpady
- Kotle na směsi paliv

2. Paliva

Palivem je nazývána každá látka, jejímž spalováním se za určitých podmínek uvolňuje teplo. Paliva se dělí na přírodní a umělé látky. Tyto látky se po zahřátí na jejich zápalnou teplotu a při dostatečném přívodu vzduchu začínají spalovat. Přírodní i uměle vyrobené látky musí splňovat jistá kritéria, aby byly vhodně využitelné ve spalovacích zařízeních, kde produkují jisté množství chemické energie, tepla a vedlejších produktů. Nejdůležitějším kritériem je množství látky a přiměřená kvalita. Oblast využitelnosti jednotlivých paliv není závislá pouze na jejich vlastnostech, ale také na spalovacích technologiích. Pro spalování v kotlích jsou nejlépe aplikovatelná energetická paliva. Energetická paliva jsou taková paliva, která nelze vhodně použít pro ostatní účely. Účelně použitelných paliv je nespočet a dělí se dle různých kritérií [3], [4].

2.1. Složení paliv

Složení paliv se určuje hrubým nebo prvkovým rozbořem [3].

- Hrubý rozbor – stanovuje poměrný obsah hořlaviny, popelovin a vody
- Prvkový rozbor – stanovuje poměrné obsahy prvků hořlaviny

2.1.1. Hrubý rozbor

Určuje poměr mezi hořlavinou, popelovinou a vodou obsažených v palivu. Platí vztahy [2], [3]:

$$h + A + W = 100 [\%] \quad (2.1)$$

kde:

h hořlavina [%]
A popelovina [%]
W voda [%]

$$h + A + W = 1 [-] \quad (2.2)$$

kde:

h hořlavina [-]
A popelovina [-]
W voda [-]

Hořlavina je nositelem tepla v palivu a výrazně ovlivňuje jeho vlastnosti. Na složení hořlaviny závisí měrná tepelná kapacita c a výhřevnost paliva Q_i . Složení hořlaviny se u každého paliva liší. Čím více hořlaviny palivo obsahuje, tím větší je i energetická hodnota výhřevnosti Q_i [3].

$$h = 1 - A - W [-] \quad (2.3)$$

kde:

h hořlavina [-]

A popelovina [-]

W voda [-]

$$h = 100 - A - W [\%] \quad (2.4)$$

kde:

h hořlavina [%]

A popelovina [%]

W voda [%]

Popeloviny jsou minerální látky tvořící základní složku paliv před jejich spalováním. Sulfidy, uhličitany a jílovité minerály tvoří přibližně 95 % popelovin. Zbylou část zaujímají organické hmoty, halogenové a akcesorické minerály. Popeloviny výrazně snižují výhřevnost paliva Q_i [3].

V každém tuhém palivu voda zaujímá jistý podíl. Kapalná paliva obsahují minimální procento vody, zhruba 1 %. Žádnou vodu neobsahují paliva plynná. Voda v palivu se váže různými způsoby a dělí se na následující druhy [3]:

- Přimísená voda – dostává se do paliva při manipulaci
- Povrchová voda – přilnutá k povrchu paliva
- Hrubá voda – část volné vody, která se odpaří
- Zbytková voda – část vody, která zůstane po sušení
- Okludovaná voda – vázaná na hořlavinu
- Hydrátová voda – vázaná na popeloviny
- Veškerá voda – součet hrubé, zbytkové a povrchové vody
- Volná voda – součet přimísené a hrubé vody
- Vázaná voda – součet zbytkové a okludované vody

2.1.2. Prvkový rozbor

Hořlavina se skládá z aktivních a pasivních prvků, kde každý prvek zaujímá v hořlavině jistý poměrný obsah [3].

Aktivní prvky [3]:

- Uhlík
- Vodík
- Síra

Pasivní prvky [3]:

- Kyslík
- Dusík

Složení hořlaviny lze vyjádřit vztahem [3]:

$$C + H_2 + S + O_2 + N_2 = 1 \text{ [kg]} \quad (2.5)$$

kde:

C	uhlík [kg]
H ₂	vodík [kg]
S	síra [kg]
O ₂	kyslík [kg]
N ₂	dusík [kg]

2.1.3. Celkové složení paliva

Celkové složení paliva je vyjádřeno součtem jednotlivých prvků a složek, které jsou dány vztahem [3]:

$$C + H_2 + O_2 + S + N_2 + W + A = 100 \text{ [%]} \quad (2.6)$$

kde:

C	uhlík [%]
H ₂	vodík [%]
O ₂	kyslík [%]
S	síra [%]
N ₂	dusík [%]

W voda [%]

A popelovina [%]

Pro spalování se používá upravené palivo, které je zbaveno povrchové vody a vzniká tak suchá hmota. Pro suchou hmotu paliva je dán vztah [3]:

$$C + H_2 + O_2 + S + N_2 + A = 100 \text{ [%]} \quad (2.7)$$

kde:

C uhlík [%]

H₂ vodík [%]

O₂ kyslík [%]

S síra [%]

N₂ dusík [%]

A popelovina [%]

2.2. Vlastnosti paliv

Paliva se svými charakteristickými vlastnostmi výrazně odlišují. Jednotlivé vlastnosti rozhodují o konstrukci a druhu použitého spalovacího zařízení. Vlastnosti paliv se dělí do čtyř skupin [3]:

- Fyzikální a chemické vlastnosti
- Energetické vlastnosti
- Pyrotechnické vlastnosti
- Spalovací vlastnosti

2.2.1. Fyzikální a chemické vlastnosti

- Absorpce – schopnost kapaliny pohlcovat molekuly plynných složek
- Adsorpce – schopnost pohlcování molekul na povrchu tuhých látek
- Difuze – prolínání plynů, získání směsí stejného složení
- Toxicita – jedovatost [3]

2.2.2. Energetické vlastnosti

- Výhřevnost Q_i – teplo uvolněné spálením 1 kg paliva za tlaku 101 325 Pa při ochlazení spalin na teplotu výchozích látek, přičemž vodní pára ve spalinách zůstane v plynné fázi. Označujeme ji jako dolní výhřevnost. Dle výhřevnosti se rozdělují druhy přírodních a umělých paliv [2], [3].
- Spalné teplo Q_s – množství tepla, uvolněné 1 kg nebo 1 m³ paliva za tlaku 101 325 Pa při ochlazení spalin na teplotu výchozích látek, přičemž vodní pára ve spalinách zkondenzuje [2], [3].

Vztah mezi výhřevností a spalným teplem [2], [3]:

$$Q_i = Q_s - r \cdot (H_2 + W) \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.8)$$

kde:

Q_i výhřevnost [MJ · kg⁻¹]

Q_s spalné teplo [MJ · kg⁻¹]

H_2 vodík [%]

W voda [%]

r výparné teplo vody [MJ · kg⁻¹]

Výhřevnost směsi paliv se určí ze vztahu [2], [3]:

$$Q_i = Q_{i1} \cdot m_1 + Q_{i2} \cdot m_2 + \dots + Q_{in} \cdot m_n \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.9)$$

kde:

Q_i výhřevnost [MJ · kg⁻¹]

Q_{in} výhřevnost dílčího paliva [MJ · kg⁻¹]

m_n hmotnost dílčího paliva [kg]

2.2.3. Pyrotechnické vlastnosti

Pyrotechnické vlastnosti jsou důležité převážně pro spalovací proces. Mají význam při návrhu spalovací komory či hořáku. Rozlišují se celkem 4 typy hoření [3]:

- Fluidní hoření
- Hoření paliv v prostorových ohniskách
- Výbušné hoření – pro kapalná a plynná paliva
- Normální hoření

2.2.4. Spalovací vlastnosti

Mezi spalovací vlastnosti patří [3]:

- Vznícení
- Samovznícení
- Teplota samovznícení – obtížně stanovitelná
- Zápalná teplota
- Mez zápalnosti – horní a dolní mez zápalnosti
- Rychlost zapalování

3. Rozdělení paliv

Jedno ze základních dělení paliv, je dělení dle skupenství na tuhá, kapalná a plynná paliva. Tato paliva se dále dělí na přírodní a umělá. Umělá paliva bývají často upravována a zušlechťována. Zušlechtění může být mechanické či chemické. Paliva se dělí dle původu na fosilní, obnovitelná a odpadní. Fosilními palivy nazýváme těžená paliva, která nelze obnovit. Nejvíce užívaným obnovitelným palivem je biomasa, to znamená veškerá hmota organického původu. Odpadní paliva vznikají jako zbytek po lidské činnosti. Mezi ně se řadí komunální odpady a průmyslové odpady [3], [5].

Tabulka 1: Rozdělení paliv dle skupenství [3]

Tuhá	Přírodní	Antracit, černé uhlí, hnědé uhlí, lignit, rašelina, dřevo
	Umělá	Koks, polokoks, brikety, uhelný prášek
Kapalná	Přírodní	Ropa
	Umělá	Nafta, benzín, petrolej, topné/dehtové/syntetické oleje
Plynná	Přírodní	Zemní plyn
	Umělá	Bioplyn, dřevoplyn, propan – butan, koksárenský/karbonizovaný/generátorový plyn, vodní plyn

Tabulka 2: Rozdělení paliv dle původu [3]

Fosilní	Uhlí, ropa, zemní plyn
Obnovitelná	Biomasa, bioolej, bioplyn
Odpadní	Komunální a průmyslové odpady

4. Rozdělení paliv dle skupenství

4.1. Kapalná paliva

Kapalná paliva patří k velmi bezpečným, při smíšení se vzduchem nevytvářejí výbušnou směs a jsou hořlavinou 3. třídy. Rozlišují se chemickým složením a fyzikálními vlastnostmi. Kvalita kapalného paliva je určena dle obsahu síry a energetických vlastností. V energetice najdou využití hlavně topné oleje. Topné oleje mají vysokou výhřevnost, nízký obsah vody a popela, a proto jsou výhodnými palivy na výrobu tepelné energie k vytápění. Nevýhodou je však potřeba ropovodu v optimální vzdálenosti a velký prostor pro skladování. Topné oleje se rozdělují na extra lehké (ELTO), lehké (LTO) a těžké (TTO). Kapalná paliva disponují nízkým bodem tuhnutí, a proto je nutné při skladování či dopravě zajistit dohřívání [3], [5].

Kapalná paliva se dle kvality dělí na [3]:

- Těžká kapalná paliva
- Lehká kapalná paliva
- Extra lehká kapalná paliva

Základním zdrojem pro výrobu kapalných paliv je ropa a v přírodním stavu ji téměř nelze využít. Ropa je tvořena směsí uhlovodíků a sloučenin síry, kyslíku, dusíku a minerálních látek. Složení ropy závisí na jednotlivých nalezištích a pro každé naleziště existuje odlišné složení ropy, ale pro danou oblast je složení podobné. Ropa se zpracovává pomocí destilace, při které jsou odděleny frakce různé hustoty dle bodu varu od 60 °C do 350 °C. Základními procesy zpracování ropy jsou odsolení, frakční destilace a odsíření. Frakční destilace se dělí na atmosférickou a vakuovou destilaci [3], [5], [6], [7].

4.1.1. Charakteristické vlastnosti kapalných paliv

Charakteristické vlastnosti paliv jsou dány jejich chemickým složením. Chemické složení závisí na složení ropy a zušlechtní. Rozhodující parametr pro vlastnosti kapalných paliv je podíl parafinických a aromatických uhlovodíků. Tento podíl se určuje dle hustoty poměru uhlíku a vodíku, nazývá se poměr C/H. Se vzrůstajícím poměrem C/H a vzrůstající hustotou převládá charakter aromatický. S klesajícími hodnotami převládá

charakter parafinický. Výhřevnost topných olejů klesá se stoupajícím obsahem síry a naftenicko-aromatických uhlovodíků [8].

Mezi základní charakteristické vlastnosti kapalných paliv se řadí [8]:

- Obsah vody – maximálně 0,5 hm% pro LTO, 1 hm% pro TTO
- Obsah popela – maximálně 0,1 hm% pro LTO, 0,5 hm% pro TTO
- Hustota – přibližně 0,9 až 1,1 g · cm⁻¹
- Teplota vzplanutí – 1. třída do 21 °C, 2. třída do 65 °C, 3. třída do 125 °C,
- Teplota tuhnutí – pohybuje od -80 °C, do +60 °C,
- Viskozita – dynamická a kinematická
- Karbonizační zbytek – maximálně 0,5 hm% pro ELTO, 0,8 hm% pro LTO a 15 hm% pro TTO
- Výhřevnost – pohybuje se od 36,8 MJ · kg⁻¹ do 44,7 MJ · kg⁻¹
- Obsah síry – přibližně od 0,1 hm% do 3 hm%
- Složení popela
- Poměr C/H – topné nafty 6 až 6,5, LTO 6,5 až 7,4, TTO a mazut 7,4 až 8

4.2. Plynná paliva

Plynná paliva jsou všechny plyny obsahující směsi hořlavých a nehořlavých plynů. Pro spalování je nejvíce užitečným plynem zemní plyn, který se přepravuje plynovodními rozvody na velké vzdálenosti. Zemní plyn je přírodního původu, obsahuje vysoký podíl metanu, je přibližně dvakrát lehčí než vzduch, výbušný a nedýchatelný. Zemní plyn neobsahuje oxid uhelnatý, a proto se neřadí mezi jedovaté plyny. Zásadní veličinou pro zařazení je výhřevnost. Topné plyny se dle ČSN 38 5502 dělí do čtyř skupin [3], [5], [8]:

- Topné plyny málo výhřevné – Q_i do 8,35 MJ · m⁻³, vysokopecní plyn, generátorové plyny z koksu, černého a hnědého uhlí, zemní plyn reformovaný vzduchem či směsný plyn.
- Topné plyny středně výhřevné – Q_i od 8,36 do 12,25 MJ · m⁻³, plyn z karbonizace hnědého uhlí, vodní plyn z koksu a uhlí, zemní plyn reformovaný parou či propan-butan.
- Topné plyny velmi výhřevné – Q_i od 12,26 do 20,8 MJ · m⁻³, karburovaný vodní plyn, svítiplyn či karburovaný zemí plyn.

- Topné plyny velmi vysoce výhřevné – Q_i nad $20,81 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$, zemní plyn, olejový plyn, propan-butan či plyny z krakování nafty.

4.2.1. Charakteristické vlastnosti plynných paliv

Plynná paliva mají dvě skupiny charakterizující jejich vlastnosti, a to vlastnosti fyzikální, chemické a spalovací. Dále pak dvě skupiny charakterizující jejich veličiny, a to veličiny kalorimetrické a pyrometrické [8].

Fyzikální a chemické vlastnosti topných plynů [8]:

- Absorpce – míra schopnosti pohlcování plynů
- Adsorpce – schopnost zadržování plynů či par na povrchu látek
- Hygroskopičnost – míra schopnosti pohlcování vlhkosti
- Difuze – vzájemné prolínání plynů
- Toxicita – míra škodlivosti pro lidský organismus

Spalovací vlastnosti [8]:

- Vznícení – samovolná zrychlující se spalovací reakce
- Samovznícení – odvedené teplo musí být menší než teplo uvolněné
- Zápalná teplota – teplota okolí, při které dojde ke vznícení
- Teplota samovznícení – hranice mezi oxidací a spalováním
- Meze zápalnosti – dolní a horní mez zápalnosti
- Rychlost spalování – rychlost, kterou se šíří plamen

Kalorimetrické veličiny [8]:

- Spalné teplo – pohybuje se od $3,71$ do $39,15 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$,
- Výhřevnost – pohybuje se od $3,66$ do $35,1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$,
- Měrné teplo – výpočet z měrného tepla jednotlivých složek

Pyrometrické veličiny [8]:

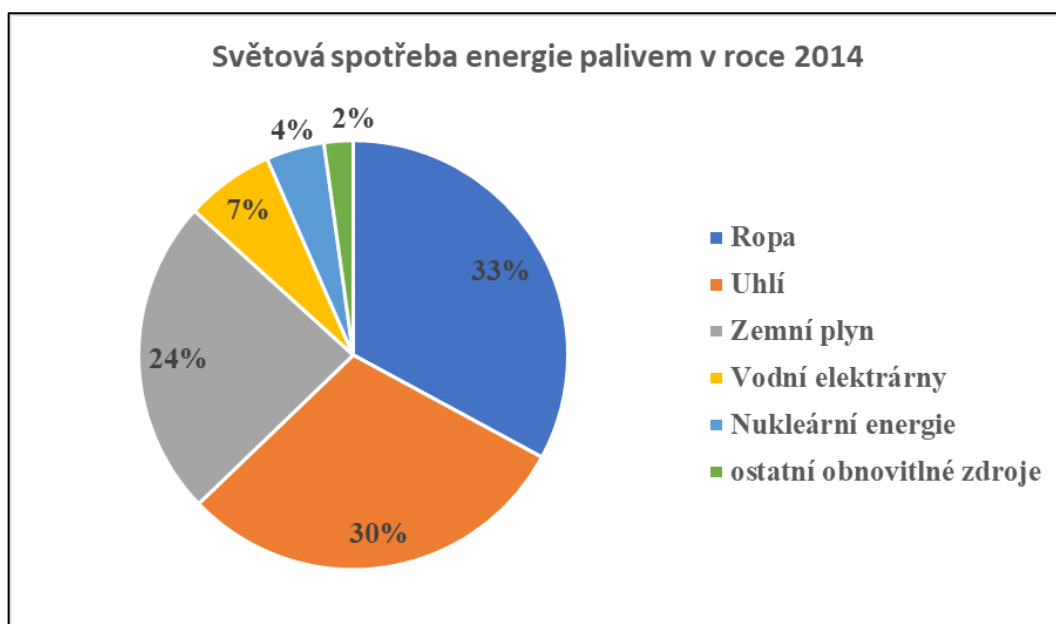
- Detonace – spalovací reakce, kterou doprovází prudký nárůst tlaku
- Mez výbušnosti – oblast detonačního spalování
- Měrná výkonnost plamene – množství tepla uvolněné za čas na určitou plochu

5. Rozdělení paliv dle původu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3, paliva se dle původu dělí na fosilní, obnovitelná a na paliva z odpadů [5].

5.1. Fosilní paliva

Fosilní paliva dominují jako nejvíce využitelný zdroj energie. Mezi fosilní paliva se řadí uhlí, ropa a zemní plyn. Fosilní paliva jsou tvořena přirozenými procesy, jako je rozklad organických zbytků mrtvých rostlin či živočichů nebo anaerobním rozkladem. Paliva tvořená fosilizovanými pozůstatky mrtvých rostlin a živočichů jsou mnohdy starší než 650 milionů let a obsahují vysoké procento uhlíku. Využívání fosilních paliv a zemědělských metod založených na fosilních palivech umožnilo rozvoj společnosti, v níž se každý může snadno a rychle pohybovat, konzumovat potraviny a jiné výrobky vyráběné levně a efektivně po celém světě. Základní charakteristikou fosilních paliv je jejich vysoká energetická hustota, a proto zaujímají majoritní podíl v primárních zdrojích energie, v roce 2014 celkem 87 %. Uhlí je velmi stabilní prvek a kapalná paliva, jako benzín, motorová nafta a petrolej jsou vysoce univerzální a snadno se dostávají z rafinérií do rukou konečných uživatelů [6], [9].



Graf 1: Světová spotřeba energie palivem v roce 2014 [6]

5.2. Obnovitelná paliva

Do obnovitelných zdrojů energie patří energie větrná, vodní, solární, geotermální a energie z biomasy. V této práci nás ovšem nejvíce bude zajímat biomasa a výrobky z ní. Obnovitelná paliva z biomasy se vyskytují v různém skupenství a nazývají se biopaliva. Jsou to veškerá paliva organického původu. Dělí se na paliva tuhá, kapalná a plynná. Biopaliva se třídí do tří generací [9], [10], [11], [12], [13]:

- Paliva první generace – původem z plodin, např. bionafta, rostlinné oleje
- Paliva druhé generace – původem z vedlejších zemědělských produktů nebo energetických rostlin, např. bioethanol, biomethanol a biohydrogen
- Paliva třetí generace – původem z mořských řas a kynobakterií, bioplyn, např. bioethanol či biobuthanol

Tuhá biopaliva se zařazují do dvou hlavních skupin [9], [10], [11], [12], [13]:

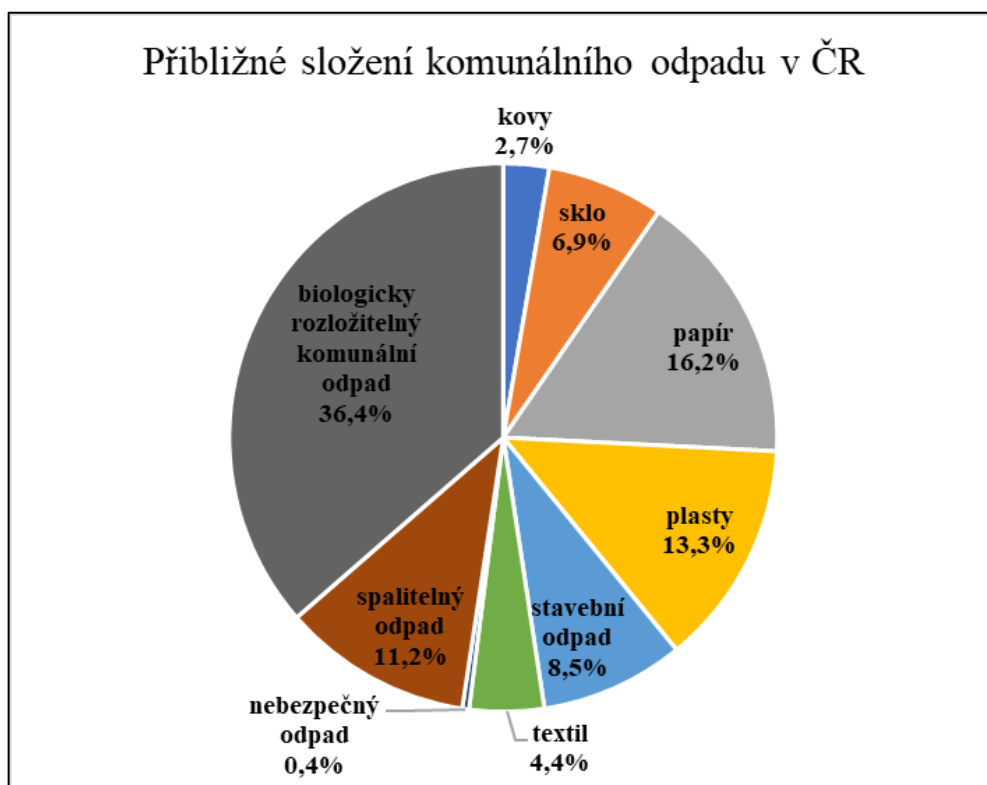
- Lesní dřeviny – např. palivové dříví, odřezky, větve, dřevní piliny
- Zemědělské plodiny a odpady – např. olejnaté rostliny a semena, obilní plevy a sláma

Hlavním alternativním udržitelným zdrojem energie je biomasa. Rozvoj této formy alternativní energie je v době velké závislosti na fosilních palivech prioritou v oblasti vývoje a výzkumu. Efektivní využití biopaliv vede ke snížení emisí a skleníkových plynů a celkově tak napomáhají k lepšímu životnímu prostředí. Bioethanol a bionafta nachází největší využití v oblasti obnovitelných paliv. Zájem o biopaliva roste z důvodu každoročního nárůstu populace a očekávaného vyčerpání fosilních paliv. Výzkum ukazuje, že 75 % světové obnovitelné energie a 13 % světové primární energie pochází z biomasy. Do roku 2050 se odhaduje, že přibližně 30 % energie bude pocházet z biopaliv, zejména pak z biopaliv kapalných [9], [10], [11], [12], [13].

5.3. Odpadní paliva

Mezi odpadní paliva se řadí hlavně spalitelné komunální a průmyslové odpady, které mají při jejich recyklaci velký potenciál pro výrobu energie. Důležitým předpokladem pro spalování paliv z odpadů je jejich řádné třídění a označení. Průměrný obsah energetických frakcí v komunálním odpadu je asi 80 %. Přímé spalování odpadů se však vyznačuje jistými nedostatky. Koncentrace spalin je při spalování odpadů velmi vysoká,

a proto se ve spalovacích zařízeních musí používat jisté typy filtrů na čištění spalín, aby se snížila jejich koncentrace na maximální přípustnou hodnotu. Tyto filtry jsou ovšem velmi nákladné. Odpadní paliva nacházejí použití pro spalování na výrobu elektřiny a tepla. V České republice se z odpadních paliv spalují nejvíce tříděné komunální odpady, kaly z čistíren a odpadních vod či průmyslové a nemocniční odpady. Kaly z čistíren a odpadních vod obsahují řadu dobrých látek pro tepelný proces, avšak obsahují vysoký podíl vlhkosti, což se jeví jako negativní. Tříděné komunální odpady mají přibližně stejnou výhřevnost, jako hnědé uhlí a v České republice se odváží do spaloven, kterých je nedostatek. O statistice energetického využívání odpadů v České republice pojednává dokument Statistika energetického využívání odpadů a alternativách paliv v letech 1989-2017. Přibližné složení komunálního odpadu v České republice je vidět v grafu 2. [14], [15], [16].



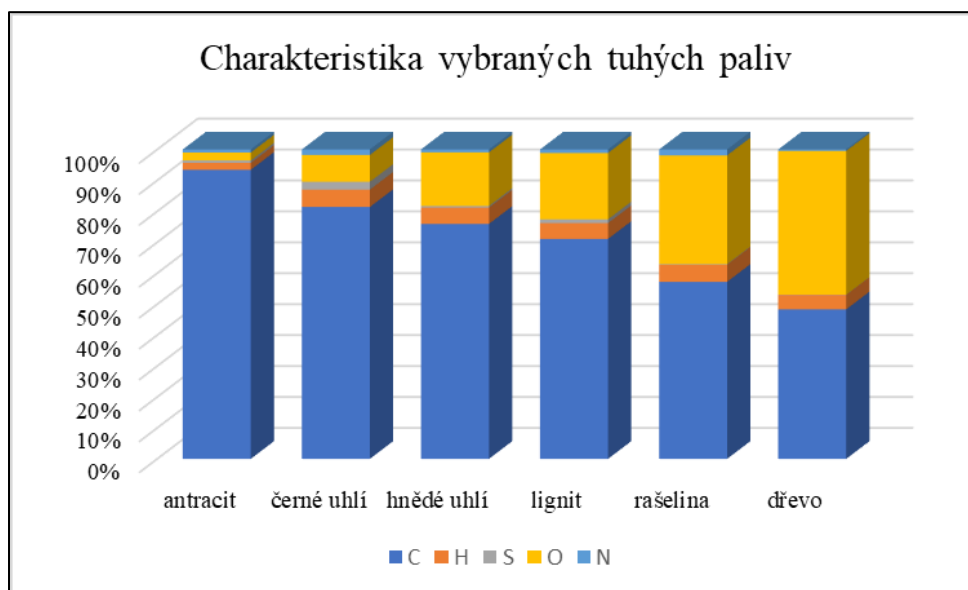
Graf 2: Přibližné složení komunálního odpadu v ČR [17]

6. Tuhá paliva

Tuhá paliva se rozdělují dle původu na přírodní a umělá. Mezi nejpoužívanější tuhá paliva se řadí [2], [18], [19]:

- Uhlí
- Umělá uhelnatá paliva
- Biomasa
- Dřevo a paliva z něj vyrobená
- Tříděný odpad

Jak již bylo řečeno v kapitole 2, složení paliv se určuje hrubým a prvkovým rozbořem a paliva jsou složena z hořlaviny, popeloviny a vody. Hořlavina zahrnuje dusík a kyslík, a proto se hořlavina nazývá aktivní složka paliva, která je nositelem energetické hodnoty. Pasivní složky paliva jsou voda a popelovina, též nazývané balast. Tyto složky snižují energetickou hodnotu paliva. Obsah popeloviny v palivu nelze nijak ovlivnit, naopak obsah vody se snižuje sušením a velký význam má například u dřeva, kde zvyšuje jeho výhřevnost. Tuhá paliva se dále dle podílu prchavé hořlaviny rozdělují na dvě kategorie, a to na paliva krátko-plamenná a dlouho-plamenná. Toto dělení má velký význam pro následnou konstrukci kotle. Jako hranici mezi kategoriemi lze považovat podíl prchavé hořlaviny 50 %. Uhlí se dle vlastností rozděluje do dalších podskupin [2], [18], [19].



Graf 3: Prvkové složení hořlaviny vybraných paliv [18]

6.1. Uhlí

Uhlí je hořlavá sedimentární hornina a snadno dostupné tuhé fosilní palivo přírodního původu, které je rozšířeno po celém světě. Druhy uhlí se liší hlavně složením, geologickým stářím a prouhelněním. U různých druhů uhlí se mění podíl uhlíku, vodíku, oxidů, dusíku a síry. Uhlík, vodík a oxidy mají rozhodující vliv na spalování, dusík a síra pak na tvorbu emisí. Evropská unie se snaží ve velké míře minimalizovat spotřebu uhlí ekologickými daněmi. V roce 2014 pocházelo více než 30 % celkové světové produkované energie z uhlí. Řazení uhlí dle geologického stáří od nejstaršího po nejmladší je [2], [6], [18]:

- Antracit
- Černé uhlí
- Hnědé uhlí
- Lignit
- Rašelina

Antracit je nejstarší geologický druh uhlí a patří mezi nejčistší. Je velmi kvalitní, disponuje vysokým spalným teplem, má nízký obsah vody, prchavé hořlaviny a vysoký podíl uhlíku. Antracit vznikl dlouhá geologická období nahromaděním rostlin, řas, hub a bakterií [2], [3].

Černé uhlí je druhý nejstarší geologický druh uhlí. Je dražší, ale ekologicky šetrnější. Vznikalo dlouhá geologická období z plavuní, kapradin, přesliček. Černé uhlí má podobné vlastnosti jako antracit, ale oproti němu obsahuje více prchavé hořlaviny a méně pevného uhlíku. Disponuje vysokým spalným teplem [2], [3], [20].

Hnědé uhlí je třetí nejstarší druh uhlí. Je používáno nejčastěji, protože je levné, ale za to má menší výhřevnost a jeho spalováním se velmi zatěžuje životní prostředí. Vznikalo v třetihorách dlouhá geologická období ze sekvoje, smrků, jedle, palem a topolů. Má nízkou hodnotu prchavé hořlaviny a průměrné spalné teplo [2], [3].

Lignit je druhé nejmladší uhlí. Obsahuje vysoký podíl vody a popeloviny. Má ze všech druhů uhlí nejmenší spalné teplo a průměrnou výhřevnost [2], [3], [6].

Rašelina je nejmladší druh uhlí. Obsahuje vysoký podíl vody, protože vznikala pod vodou rozkladem rostlin v nejmladším geologickém období. Má ze všech druhů uhlí

největší podíl prchavé hořlaviny a popeloviny, ale zároveň má podobnou hodnotu spalného tepla jako hnědé uhlí [2], [3], [6].

Řazení uhlí dle velikosti [2], [6], [18]:

- Drobné uhlí
- Krupice
- Hrášek
- Ořech
- Kostka
- Topná směs

Geologicky starší uhlí disponuje vyšším spalným teplem a výhřevností, ale obsahuje menší podíl prchavé hořlaviny. Naopak geologicky mladší uhlí má nižší podíl uhlíku, vyšší obsah kyslíku a vodíku, snadněji se zapaluje a k hoření potřebuje nižší hodnoty spalovacích teplot [2], [6], [18].

Výhody užívání uhlí jako paliva [18]:

- Levnější než ostatní paliva
- Nezávislost na dovozu z jiných států
- U automatizovaných kotlů vysoká účinnost a malá míra znečištění ovzduší

Nevýhody užívání uhlí jako paliva [18]:

- U starších kotlů nízká účinnost a velká míra znečištění ovzduší
- Neobnovitelný zdroj energie, který dochází a tvorba uhelných dolů

6.2. Umělá uhelnatá paliva

Umělá uhelnatá paliva jsou oproti ostatním těženým palivům dražší, avšak disponují lepšími vlastnostmi a dobrou výhřevností [2].

Mezi nejčastěji používaná umělá uhelnatá paliva se řadí [3]:

- Uhelné brikety
- Uhelné pelety
- Koks
- Polokoks
- Dřevěné uhlí

Uhelné brikety se vyrábí lisováním rozemletého černého nebo hnědého uhlí či antracitu do tvaru válečků či hranolů. Uhelné brikety zaručují dlouhé hoření. Brikety vyrobené z antracitu hoří až třikrát déle než uhlí. Výhodou uhelných briket je nekolísavost teploty během spalování. Hlavními parametry uhelných briket jsou [18]:

- Obsah popela 6-8 %
- Šetrnější k životnímu prostředí
- Vlhkost nepřekračuje 10 %
- Výhřevnost $25-32 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Uhelné pelety se vyrábí z uhelného prachu s uhelným dehtem jako pojivem. Uhelné pelety jsou odolné vůči pohlcení vody, a proto disponují nízkou vlhkostí a dobrou pevností. Hlavními parametry uhelných pelet jsou [18]:

- Vlhkost nepřekračuje 10 %
- Výhřevnost přibližně $22 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

6.3.Dřevo

Dřevo patří mezi nejvíce rozšířenou formu tuhého paliva. Význam dřeva jako paliva začíná výrazně růst z důvodu obavy vyčerpání neobnovitelných paliv a ochrany životního prostředí. Dřevo je snadno dostupné a jako palivo velmi významné. Palivové dříví by nemělo obsahovat více jak 70 % hniloby, aby se dalo kvalitně využít. Palivové dříví pro spalování by nemělo obsahovat více jak 20 % vlhkosti. Čerstvé dřevo obsahuje přibližně 40-50 % vlhkosti. Pokud se dřevo kvalitně uloží, přibližně za 2 roky dojde k jeho vysušení na požadovanou vlhkost 20 % [19], [21].

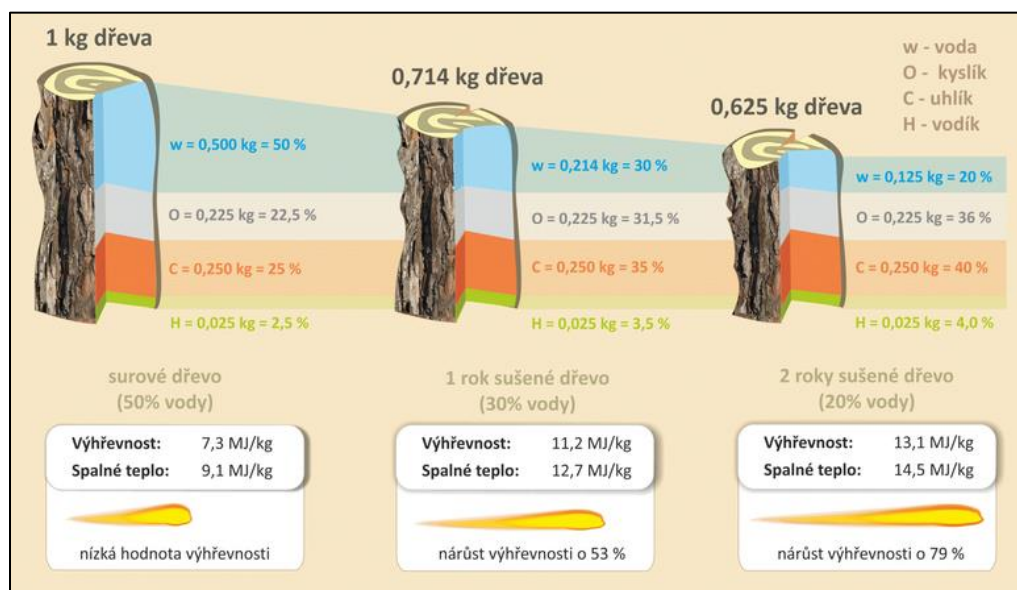
Dělení dřeva dle typu dřeviny [19], [21]:

- Listnaté
- Jehličnaté

Dělení dřeva dle tvrdosti [19], [21]:

- Tvrdé – většinou listnaté, hoří dlouho a stabilně, nejiskří
- Měkké – většinou jehličnaté, obsahuje pryskyřici, rychle hoří, jiskří, kouří

Jehličnaté dřevo má vyšší výhřevnost než dřevo listnaté z důvodu obsahu pryskyřice. Mezi nejvyšší paliva se řadí dubové dřevo, buk, habr a jasan. Jedná se o tvrdé dřevo s kvalitní výhřevností, ale vyšší pořizovací cenou. Do zvláštní skupiny se řadí energetické dřeviny, které jsou rychle rostoucí, mají dobrou výhřevnost a odolávají škůdcům. Do skupiny energetických dřevin patří vrby nebo topoly. Za nevhodné palivové dřevo se považuje dřevo chemicky ošetřené, např. dřevotřískové desky či železniční pražce [19].



Obrázek 1: Vysušování dřeva a průběh snižování vlhkosti [21]

6.4. Vlastnosti tuhých paliv

Mezi základní charakteristické vlastnosti tuhých paliv patří [8]:

- Spalné teplo Q_s^r ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
- Výhřevnost Q_i^r ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
- Obsah síry S^r (%)
- Obsah vody v původním palivu W^r (%)
- Obsah popela v původním palivu A^r (%)
- Obsah popela v suchém palivu A^d (%)
- Spékavost a napuchavost – spojování zrn paliva ve větší kusy vlivem spalování
- Sytná hmotnost ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$) – hmotnost sypaného paliva
- Prchavá hořlavina v hořlavině V^{daf} (%)

- Charakteristické teploty popela t_A , t_B , t_C ($^{\circ}\text{C}$), kde t_A je teplota počátku měknutí, t_B teplota tání a t_C teplota počátku tečení

Mezi další sledované vlastnosti tuhých paliv patří melitelnost paliva, zrnění, měrná hmotnost, abrazivita popele, teplota samovznícení, dolní a horní mez výbušnosti prachu [2].

6.4.1. Spalné teplo

Spalné teplo se určuje pomocí kalorimetru ve specializované laboratoři, kde se palivo spálí při určitém tlaku v kalorimetrické bombě. Tato bomba je uložena ve vodní lázni [2].

$$Q_s^r = \frac{V \cdot \Delta T}{G} \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.1)$$

kde:

Q_s^r spalné teplo [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

V vodní hodnota kalorimetru [$\text{MJ} \cdot \text{K}^{-1}$]

G hmotnost paliva [kg]

ΔT rozdíl teplot [K]

6.4.2. Výhřevnost

Lépe, než se spalným teplem se při našich podmínkách počítá s výhřevností. Výhřevnost se určuje na základě spalného tepla, hrubého či prvkového rozboru paliva [2].

- Výpočet na základě spalného tepla

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.2)$$

kde:

Q_i^r výhřevnost [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Q_s^r spalné teplo [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

r měrné výparné teplo vody [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

W^r obsah vody v původním palivu [%]

H_2 obsah vodíku v surovém palivu (v 1 kg vodíku je 8,94 kg vody) [–]

- Dulongův vzorec – pro geologicky mladší paliva

$$Q_i^r = 33910 \cdot C^r + 120580 \cdot \left(H^r - \frac{O^r}{8} \right) + 10470 \cdot S^r - 2453 \cdot W^r$$

$$[MJ \cdot kg^{-1}] \quad (6.3)$$

kde:

Q_i^r výhřevnost $[MJ \cdot kg^{-1}]$
 C, H, O, S obsah prvku v palivu [%]
 W^r obsah vody v palivu [%]

- Vondráčkův vzorec – pro geologicky starší paliva

$$Q_i^r = (37200 - 2596 \cdot C^h) \cdot C^r + 90690 \cdot H^r + 10470 \cdot S^r - 11300 \cdot O^r - 2453 \cdot W^r$$

$$[MJ \cdot kg^{-1}] \quad (6.4)$$

kde:

Q_i^r výhřevnost $[MJ \cdot kg^{-1}]$
 C, H, O, S obsah prvku v palivu [%]
 W^r obsah vody v palivu [%]

- Mendělejevův vzorec – obecný

$$Q_i^r = 33190 \cdot C^r + 103000 \cdot H^r - 10900 \cdot (O^r - S^r) - 2453 \cdot W^r$$

$$[MJ \cdot kg^{-1}] \quad (6.5)$$

kde:

Q_i^r výhřevnost $[MJ \cdot kg^{-1}]$
 C, H, O, S obsah prvku v palivu [%]
 W^r obsah vody v palivu [%]

6.4.3. Obsah síry v palivu

Síra je v tuhých palivech nežádoucí a dělí se do tří složek [2]:

- Organická síra – 65 % veškeré síry
- Pyritická síra
- Síranová síra

Hmotnost síry na výhřevnost ukazuje měrná sirnatost \bar{S} , která je lepším ukazatelem než poměrný obsah síry v palivu [2].

$$\bar{S} = \frac{10 \cdot S}{Q_i^r} [\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}] \quad (6.6)$$

kde:

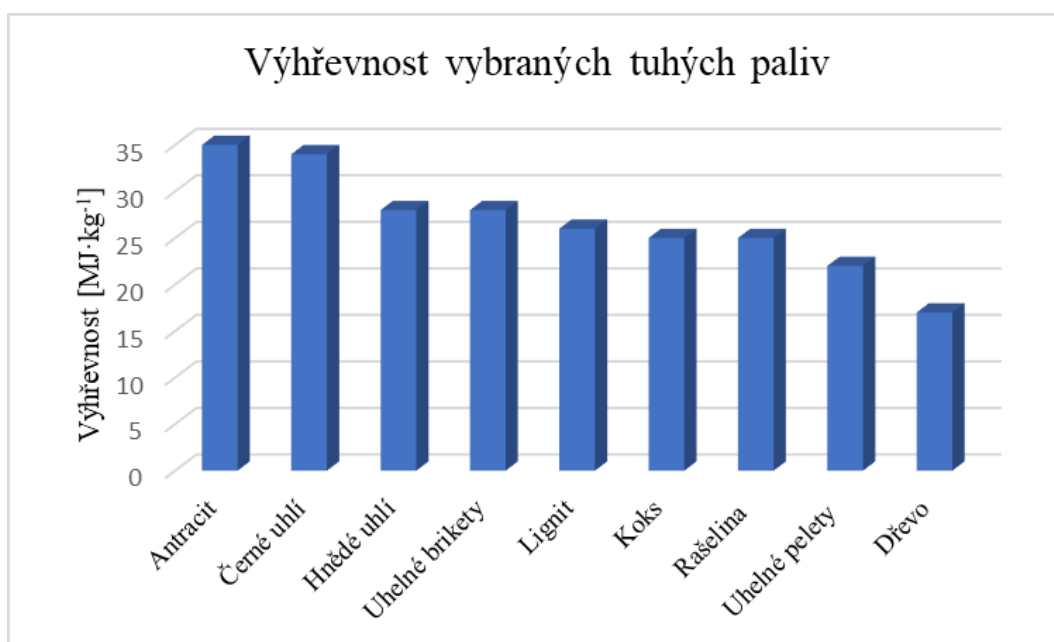
\bar{S} poměrný obsah síry v palivu [$\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$]

S obsah síry v palivu [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Q_i^r výhřevnost paliva [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

6.4.4. Charakteristické vlastnosti nepoužívanějších tuhých paliv

V grafu 4 lze vidět výhřevnost nepoužívanějších tuhých paliv. Nejlepší výhřevnosti dosahuje antracit a černé uhlí, naopak uhelné pelety či dřevo mají z těchto paliv výhřevnost nejmenší [2], [18], [22].



Graf 4: Výhřevnost vybraných tuhých paliv [2], [18], [22]

Tabulka 3: Rozbor vybraných druhů tuhých paliv [2], [22]

	Antracit	Černé uhlí	Hnědé uhlí	Lignit	Rašelina	Jehličnaté dřevo	Listnaté dřevo
Vlhkost (%)	7,7	5,2	23,4	33,3	20	30	30
Popelovina (%)	10,5	9,1	5,2	11,1	12,0	0,7	0,7
C^r (%)	83,7	74,0	72,0	63,3	57,5	51	50
H^r (%)	1,9	5,1	5,0	4,5	5,5	6,2	6,15
N^r (%)	0,9	1,6	0,9	1,0	1,9	0,6	0,6
S^r (%)	0,7	2,3	0,4	1,1	0,1	-	-
O^r (%)	2,3	7,9	16,4	19,0	35,0	42,2	43,25
Výhřevnost (MJ · kg⁻¹)	35	34	28	26	25	18,4	18,4

7. Biomasa

Biomasa je veškerá hmota organického či rostlinného původu, tvoří ji nespočet druhů, má obrovský rozsah a sdružuje zejména dendromasu (dřevní biomasa), fytomasu (bylinná biomasa) a biomasu živočišného původu. Produkce biomasy neustále roste a důležitým předpokladem pro využívání biomasy v budoucnu je udržitelný rozvoj a vytváření vhodných podmínek pro zemědělskou půdu. Biomasa jako palivo má velmi specifické vlastnosti. Biomasa se získává dvěma způsoby [23], [24]:

- Biomasa záměrně pěstovaná – pěstování rostlin k těmto účelům
- Biomasa odpadní – využití odpadů ze zemědělské, lesní či potravinářské výroby

Biomasa záměrně pěstovaná [23], [25]:

- Šťovík, křídlatka, tolice, komonice, pšenice, oves, žito, len, brukev, světlice, konopí, hořčice, pupalka, chrastice
- Olejniny, např. řepka
- Energetické dřeviny

Biomasa odpadní [23]:

- Rostlinné zbytky – sláma, zbytky po likvidaci křovin, odpady ze sadů a vinic
- Odpady z živočišné výroby – zbytky krmiv, exkrementy
- Komunální organické odpady – kaly z odpadních vod, organické odpady
- Lesní odpady – kůra, větve, pařezy, kořeny po těžbě, klest, palivové dříví, odřezky

7.1. Rozdělení biomasy

Klasifikace biomasy dle původu [25]:

- Dřevní biomasa
 - Lesní a plantážové dřevo – celé stromy, kulatina, pařezy, kůra, zbytky po těžbě dřeva, dřevní biomasa z péče o krajinu
 - Dřezozpracující průmysl, vedlejší produkty a zbytky – chemicky neošetřené a ošetřené dřevní zbytky, odpady z celulózového a papírenského průmyslu

- Použité dřevo – chemicky neošetřené a ošetřené dřevo
- Bylinná biomasa
 - Zemědělské a zahradní byliny – obilniny, traviny, olejniny, kořenoviny, luskoviny, květiny
 - Průmysl zpracovávající byliny, vedlejší produkty a zbytky – chemicky neošetřené a ošetřené bylinné zbytky
- Ovocná biomasa
 - Sadové a zahradní ovoce
 - Průmysl zpracovávající ovoce, vedlejší produkty a zbytky
- Směsi a příměsi

7.2. Způsoby využití biomasy k energetickým účelům

Využití biomasy závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech. Nejdůležitější vlastností pro následné způsoby využití je vlhkost. Vlhkost se dá také vyjádřit jako obsah sušiny v biomase. Způsoby získávání energie z biomasy jsou [23]:

- Termochemická přeměna (suché procesy)
 - Spalování
 - Zplynování – rozložení na plynné palivo
 - Pyrolýza – termický rozklad organických látek
- Biochemická přeměna (mokré procesy)
 - Alkoholové kvašení
 - Metanové kvašení
- Fyzikální a chemická přeměna
 - Mechanická úprava
 - Chemická úprava
- Získávání odpadního tepla při zpracování biomasy

7.3. Mechanické úpravy biomasy

Zpracováním a mechanickou úpravou biomasy se získávají tři druhy paliv [23]:

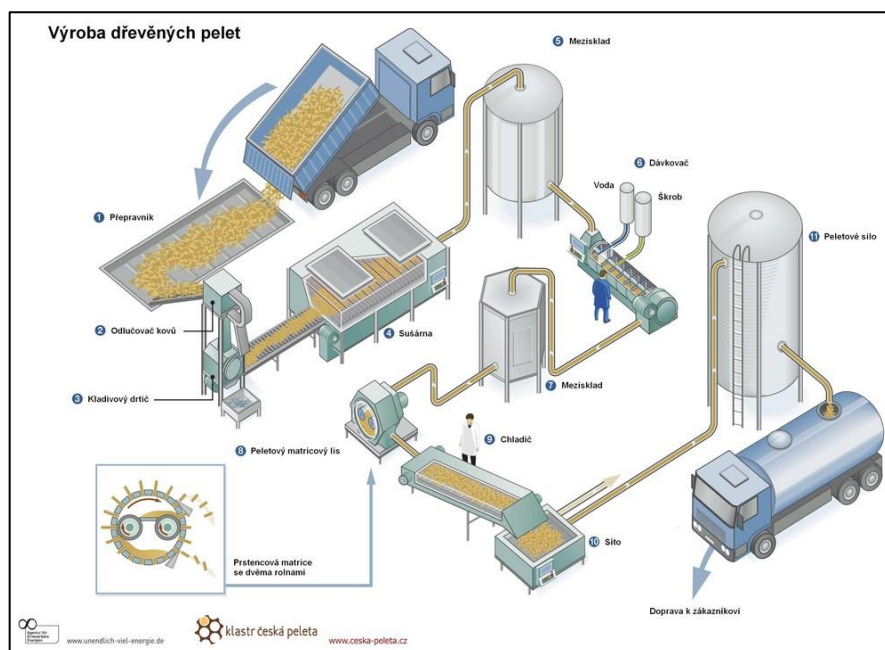
- Tuhá biomasa – palivové dříví, dřevní štěpka, pelety, brikety, piliny
- Kapalná biomasa – bioethanol, methanol, oleje, bionafta
- Plynná biomasa – bioplyn, dřevoplyn

7.4. Mechanické úpravy tuhé biomasy

Čerstvá biomasa není přímo využitelná, ale musí se před použitím vhodně upravit. Nejčastěji se biomasa upravuje do vhodného tvaru a rozměrů pomocí nejrůznějších technologií. Jako koncová úprava biomasy je nejvhodnější peletování a briketování. Pelety a brikety mají odlišné výrobní postupy. Mezi další mechanické úpravy biomasy patří drcení, lisování, štípaní či mletí. Peletovaná biomasa produkuje menší množství emisí než klasická biomasa. Pravidelná geometrie a standardizovaná velikost umožňuje pohodlné skladování a automatické podávání do kotlů [23], [24], [25].

7.4.1. Peletování

Jako surovina pro výrobu pelet slouží hmota ve formě pilin či stébelnin velkých 2-3 mm. Piliny nejdříve musí projít drtičem, který je homogenizuje. Hmota s obsahem vody nižší než 10 % může jít ihned ke zpracování, naopak hmota s vyšším obsahem vody musí nejdříve projít procesem sušení. Sušení probíhá buď katrem, v bubnových sušárnách nebo horkým vzduchem. Jako výrobní stroj se při peletování používá matricový lis (talířový, plochý, prstencový), který protlačuje materiál skrz matici, ve které jsou otvory potřebného průměru. Nakonec jsou pelety zchlazeny ze 100 °C přibližně na 40 °C a procházejí vibračním sítím oddělující pelety a odrol, který putuje zpět do výrobního procesu. [25], [26]



Obrázek 2: Peletovací linka na výrobu dřevěných pelet [26]

7.4.2. Briketování

Při briketování se využívá chemických a mechanických vlastností suroviny. Suroviny pro briketování musí splňovat různé podmínky, a to vlhkost maximálně 15 %, zrnitost do 15 mm, 6-8 % kůry a prach by neměl přesáhnout 20 %. Jako výrobní stroj se pro briketování používá vysokotlaký lis při tlaku více jak 400 MPa, který slisuje materiál do požadovaných rozměrů bez přidání pojiva. Nejvyšší brikety se lisují do poměru 100:1 [25].



Obrázek 3: Dřevěné brikety [27]

7.5. Pelety z biomasy

Pelety se vyrábějí z různých druhů biomasy (dřevo, dřevní či zemědělský odpad, piliny, stébelniny) do válcovitého tvaru o průměru 6-8 mm a délce 5-40 mm. Existují pelety dřevní, rostlinné, kůrové, rašelinové a směsné. Pelety neobsahují žádné další přísady či pojiva [24], [28], [29].



Obrázek 4: Pelety z biomasy [30]

7.6. Dřevní pelety

Dřevní pelety se svojí výhřevností řadí mezi černé a hnědé uhlí, ale mají na rozdíl od uhlí vyšší účinnost spalování a zajišťují svými vlastnostmi vyšší životnost spalovacích zařízení. Vyrábějí se bez chemických přísad z dřevního odpadu, nejčastěji pilin nebo hoblin. Všechny dřevní pelety již musí splňovat normu ENplus. Norma ENplus sleduje kvalitu výroby a přepravu pelet, aby se k zákazníkovi dostalo ekologické, komfortní a finančně výhodné palivo s nízkými emisemi. Pelety pod certifikací ENplus pocházejí z chemicky neošetřeného dřeva a do paliva nejsou přidávány žádné příměsi. Certifikaci ENplus v České republice zajišťuje organizace Klastř Česká peleta. Dřevní pelety jsou dle ENplus rozděleny do tří kategorií [29], [31], [32], [33]:

- Kategorie A1 – dřevní pelety pro kotle a kamna v domácnostech
- Kategorie A2 – dřevní pelety pro spalování ve větších kotlích
- Kategorie B – dřevní pelety pro průmyslové využití



Obrázek 5: Dřevní pelety [32]

Tabulka 4: Limitní hodnoty parametrů pro dřevní pelety dle ENplus [31]

Parametr	Jednotka	ENplus A1	ENplus A2	ENplus B
Průměr	mm	6(±1) nebo 8(±1)		
Délka	mm	3,15 – 40		
Vlhkost	% vody	≤ 10		
Popel	% sušiny	≤ 0,7		≤ 1,5
Mechanická odolnost	%	≤ 97,5		≤ 96,5
Velikost částic	%	≤ 1		
Výhřevnost	MJ · kg ⁻¹	16,5 – 19		
Objemová hmotnost	kg · m ⁻³	≥ 600		
Dusík	% sušiny	≤ 0,3		≤ 0,5
Síra	% sušiny	≤ 0,03		≤ 0,04
Chlor	% sušiny	≤ 0,02		
Arsen	% sušiny	≤ 1		
Kadmium	% sušiny	≤ 0,05		
Chrom	% sušiny	≤ 10		
Měď	mg · kg ⁻¹	≤ 10		
Rtuť	mg · kg ⁻¹	≤ 0,1		
Nikl	mg · kg ⁻¹	≤ 10		
Zinek	mg · kg ⁻¹	≤ 100		
Teplota tání popela	°C	≤ 1200	≤ 1100	

7.7. Alternativní pelety

Alternativní pelety neboli agropelety se vyrábí ze zemědělských komodit. Nejvíce ze suchých, drcených nebo řezaných rostlin či odpadních surovin po čištění zemědělských plodin, např. pšenice, hrachu, ječmene, máku, kukuřice a řepky. Mezi největší výrobce agropelet patří družstvo EKOVER, které produkuje více než 80 % veškeré výroby agropelet v České republice. V roce 2017 družstvo vyprodukovalo více než 99 tisíc tun agropelet. Družstvo EKOVER dále zřizuje licenci na výrobu certifikovaných paliv pro zemědělce a zajišťuje celkem pro 71 výrobců technologii výroby pelet, certifikaci a všechny potřebné dokumenty a legislativu. Vše potřebné sdružuje norma ČSN EN ISO 17225-6. Mezi nejčastější zemědělské komodity se řadí [34], [35], [36]:

- Energetické rostliny
- Energetické odpady
- Obiloviny a olejniny

Tabulka 5: Licenční paliva EKOVER a jejich složení [36]

NÁZEV	SLOŽENÍ PELETY
EKOVER	Odpad z čištění zemědělských plodin, plevele
EKOVER S	Seno, sláma obilnin, sláma olejnin
EKOVER T	Celé nadzemní části tritikale, sláma, klasy včetně zrna
EKOVER O	Celé nadzemní části obilnin a olejnin pěstované pro energetické využití
EKOVER F	Fermentační zbytky z bioplynových stanic
EKOVER P	Odpadní papír 100 %
EKOVER SP	Sláma obilovin a olejnin 70 % + odpadní papír 30 %
EKOVER OP	Celé nadzemní části obilovin a olejnin 70 % + 30 % odpadní papír

Tabulka 6: Průměrné fyzikální a chemické vlastnosti paliv EKOVER [36]

Fyzikální a chemické vlastnosti paliv EKOVER	
Vlhkost	8 až 15 % vody
Výhřevnost	14 až 17 MJ · kg ⁻¹
Měrná hmotnost	550 až 650 kg · m ⁻³
Obsah síry	0,1 až 0,13 %
Obsah popela	5 až 7 %

7.7.1. Energetické rostliny

Energetické rostliny, jsou bylinné rostliny záměrně pěstované pro získávání energie poskytující vysoký výnos suché hmoty. Energetické byliny se dle doby růstu dělí na jednoleté a vytrvalé. Dle botanického typu lze energetické byliny dále dělit na trávy a obiloviny či rostliny dvouděložné. Mezi dvouděložné rostliny patří zejména netradiční byliny, rostliny okrasné či plevely. [33], [37]

Jednoleté energetické rostliny [37]:

- Obiloviny – tritikale, ozimné žito
- Čirok, sudánská tráva, konopí seté, amaranthus, sléz krmný, hořčice sareptská, krambe, světlice barvířská, lnička setá

Vytrvalé rostliny [37]:

- Pupalka dvouletá, komonice setá, jestřabina východní, topinambur hlíznatý, šťovík krmný, mužák porostlý, bělotrn kulatohlavý, boryt barvířský, topolovka růžová, ozdobnice čínská (miscanthus), křídlatka

Energetické trávy [37]:

- Lesknice rákosovitá, kostřava rákosovitá, psineček veliký, ovsík vyvýšený, sveřep samužníkovitý, sveřep bezbranný

7.7.2. Obiloviny a olejniny

Technologie produkce a sklizně obilovin a olejnin je pro zemědělce důvěrně známá, a proto se tento typ biomasy hojně využívá pro výrobu alternativních pelet. Z obilovin se pro výrobu pelet po sklizni užívá nejvíce sláma. Mezi nejčastěji používané obiloviny a olejniny pro výrobu alternativních pelet patří [23], [37]:

- Pšenice
- Žito
- Ječmen
- Oves
- Kukuřice
- Řepka olejná

8. Kotle

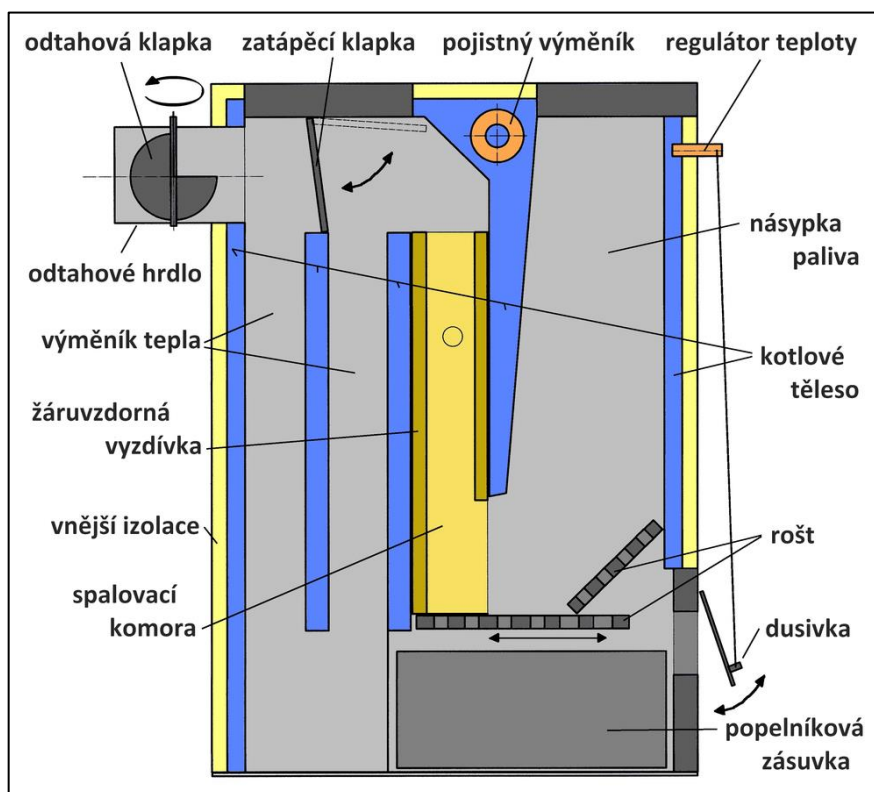
Jak již bylo řečeno v kapitole 1, základní dělení kotlů je dělení dle použitého paliva, kde se rozeznávají celkem 4 druhy kotlů [2]:

- Kotle na tuhá paliva – fosilní paliva, biomasa, tuhé odpady
- Kotle na kapalná paliva – topné oleje a kapalné odpady
- Kotle na plynná paliva – zemní plyn, umělé plyny a plynné odpady
- Kotle na směsi paliv

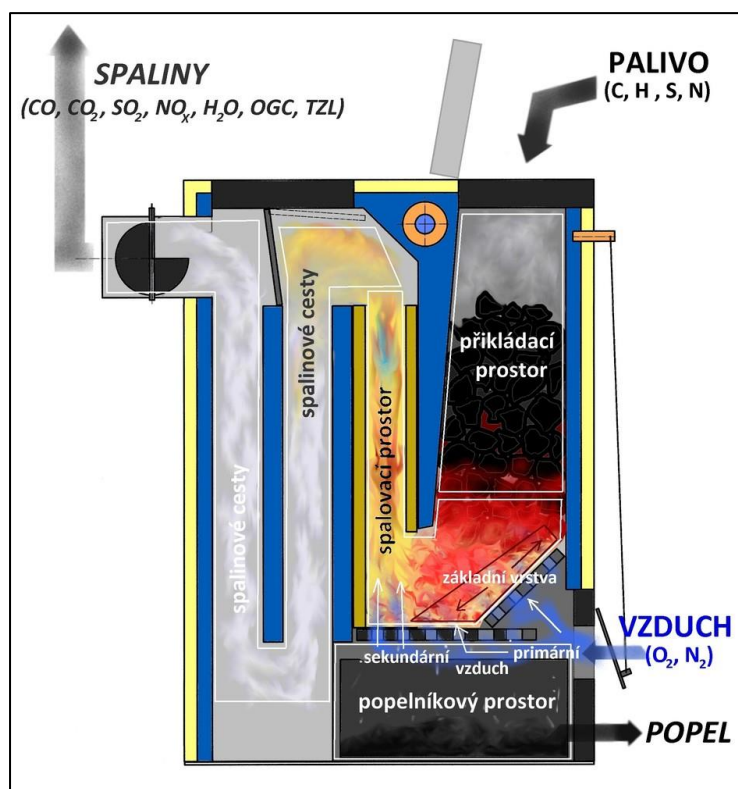
8.1. Hlavní konstrukční části kotle

- Kotlové těleso – „součást kotle, v níž se ohřívá látka [38]“
- Násypka paliva – „část kotle pro ústřední vytápění s ruční dodávkou paliva, z níž se dodává palivo pro spalování, bez připojení přívodu paliva k externímu zásobníku [39]“
- Zásobník paliva – „zásobník paliva přímo spojený s kotlem na samočinnou dodávku paliva [39]“
- Rošt – „část kotle určená ke spalování paliva ve vrstvě [38]“
- Spalovací prostor – „část vnitřního prostoru kotle, v níž probíhá spalování paliva [38]“
- Ohniště – „část kotle skládající se z roštu a spalovacího prostoru [38]“
- Popelník – „část kotle určená pro zachycování pevných zbytků spalování [39]“
- Spalinové cesty – „jsou prostory uvnitř kotle, kterými proudí spaliny [38]“
- Odtahové hrdlo – „část kotle, určená k připojení kouřovodu [38]“
- Odtahová klapka – „zařízení, kterým lze měnit průtočný průřez odtahového hrdla za účelem regulace tahových podmínek v kotli [38]“
- Zatápěcí klapka – „zařízení, kterým lze zkrátit spalinové cesty, například při uvádění do provozu [38]“
- Regulátor teploty – „zařízení, které zajišťuje a reguluje teplotu vody v kotli [39]“

- Omezovač teploty – „přístroj se samočinným řízením, který při dosažení nejvyšší mezní teploty vody vyvolá přerušení toku paliva nebo přívod spalovacího vzduchu; přívod může být obnoven po ručním zásahu obsluhy pouze tehdy, když teplota vody klesne pod mezní hodnotu [19]“
- Pojistný výměník tepla – „zařízení pro odvod přebytečného tepla z kotle, které omezí teplotu kotle na stanovenou maximální hodnotu [39]“
- Hořák – „zařízení, zajišťující trvalé spalování pevného paliva a umožňující řízení spalovacího děje [38]“
- Žáruvzdorná vyzdívka – „části kotle vyrobené z keramických materiálů s vysokou akumulací schopností [19]“
- Vnější izolace kotle – tepelná izolace odolná vůči mechanickým a tepelným namáháním vyrobená z nehořlavého materiálu [19]



Obrázek 6: Základní konstrukční části kotle [40]



Obrázek 7: Schéma kotle na tuhá paliva [40]

8.2. Roztřídění kotlů na tuhá paliva do základních kategorií

Kotle dle způsobu dodávání paliva [19]:

- Kotel s ruční dodávkou paliva
- Kotel se samočinnou dodávkou paliva

Kotle dle způsobu spalování tuhých paliv [2]:

- Kotle roštové – palivo je podepíráno roštem
- Kotle fluidní – spalování ve fluidní vrstvě
- Kotle práškové – palivo je zaváděno hořáky

Kotle dle technologie spalování [2], [19], [41]:

- Prohořivací kotel – nejstarší a nejjednodušší konstrukce kotle s ručním příkládáním paliva. V kotli probíhá postupné spalování a palivo je příkládáno na základní hořící vrstvu, kde primární vzduch přichází do kotle zespodu přes rošt a se spalinami odchází přes celou vrstvu paliva. Zapálení se uskutečňuje zespodu a přísun vzduchu je řízen ručně, průběh

spalování je periodický a způsobuje kolísání výkonu kotle. Přidává se menší množství paliva v pravidelných intervalech.



Obrázek 8: Prohořivací kotel [41]

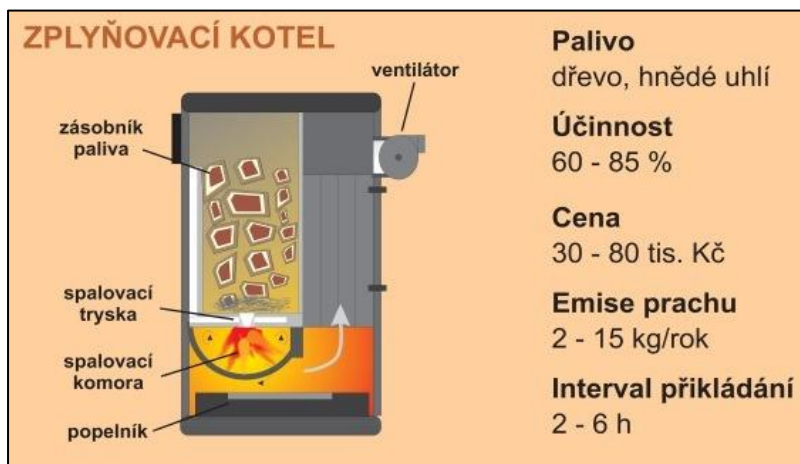
- Odhořivací kotel – v kotli probíhá postupné spalování a palivo je umístěno v násypce, kde se postupně uvolňuje prchavá hořlavina a odchází do spalovací komory. Spaliny jsou odváděny dolů nebo do strany a jsou odtahovány ventilátorem. Spalovací proces je stabilnější než u prohořivacího kotle, protože palivo se nemusí tak často doplňovat a přísun vzduchu řízen ručně. Používá se u kotlů na uhlí, dřevo nebo pelety.



Obrázek 9: Odhořivací kotel [41]

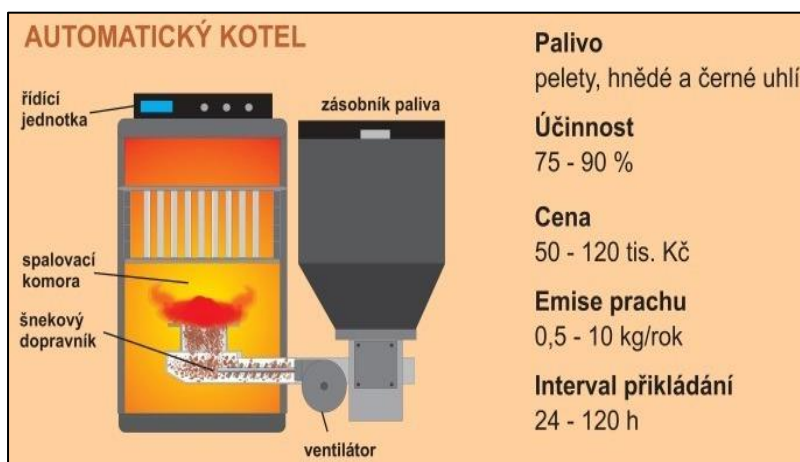
- Zplyňovací kotel – nejmodernější zařízení na spalování dřeva, kde kotel převádí spalování tuhého paliva na spalování plynu. Patří do skupiny odhořivacích kotlů, funguje na principu dvoustupňového spalování, kde se z primárního vzduchu vytvoří hořlavý plyn a ventilátorem se vžene

do spalovací komory, kde se setkává se vzduchem sekundárním. Přísun vzduchu je řízen automatickým ventilátorem a spaliny odcházejí do komína.



Obrázek 10: Zplyňovací kotel [41]

- Automatický kotel – nejkomfortnější a velmi ekologické zařízení. Zásobník paliva je umístěný mimo a dopravník dodává jen potřebné množství paliva. Jedná se o kotel se samočinnou dodávkou paliva, kde je přísun vzduchu řízen automatickým ventilátorem.



Obrázek 11: Automatický kotel [41]

Kotle dle druhu použitého materiálu [19]:

- Ocelové
- Litinové

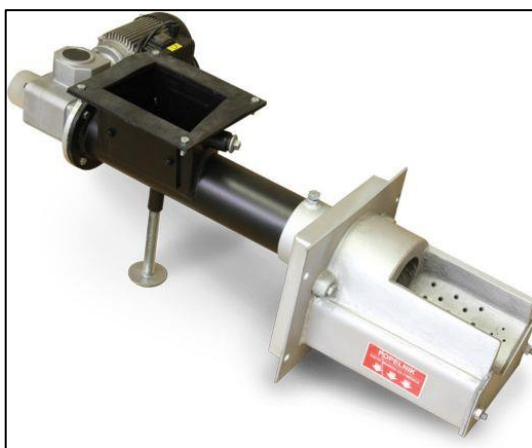
8.3. Typy hořáků pro automatické kotle

Pro automatické kotle se vyrábí 5 nejčastějších druhů hořáků [42], [43]:

- Univerzální samočistící hořák
- Retortový hořák
- Univerzální čtvercový hořák
- Hořák s pohyblivými deskami
- Rotační hořák

8.3.1. Univerzální samočistící hořák od firmy Kovarson

Univerzální samočistící hořák firmy Kovarson (obrázek 12) disponuje jednoduchou konstrukcí, širokou použitelností a snadnou údržbou, díky samočistící technologii. Hořák lze použít na všech typech litinových kotlů na tuhá paliva a používá se nejčastěji pro vytápění rodinných domů. Skvěle spaluje rostlinná paliva, např. agropelety, u kterých často dochází ke spékání. Skládá se z vzduchové směšovací komory a roštu, který je umístěn nad komorou. Funguje na principu vtlačování paliva ze šnekového podavače přímo na rošt hořáku, kde za pomoci ventilátoru dochází ke spalování, popel a případný nedopal přepadá do popelníku. Vzniklé spečence dokáže hořák vytlačit ven. Zvýšení účinnosti spalování zajišťuje foukání vzduchu ze dvou stran. Technologie hořáku funguje na podobném principu jako kovářská výheň. Hořák je vhodný pro spalování dřevních pelet, alternativních pelet, hnědého a černého uhlí, štěpky, dřevního odpadu a rostlinných materiálů [44], [45].



Obrázek 12: Univerzální samočistící hořák [42]

8.3.2. Retortový hořák od firmy Kovarson

Retortový hořák firmy Kovarson (obrázek 13) disponuje litinovou konstrukcí a je tvořen materiály, které zaručují dlouhou životnost a snadnou údržbu. Hořák lze použít na všech typech litinových kotlů na tuhá paliva a používá se především pro vytápění rodinných domů a středně velkých objektů. Základem hořáku je kulatá pec, určená pro spalování paliv. Funguje na principu vtlačování paliva ze šnekového podavače do pece ve tvaru kolene, kde se palivo pěchuje, drtí a dochází k následnému spalování. Popel a případný nedopal přepadává přes retortu do popelníku. Tímto hořákem nelze spalovat spékavá paliva, z důvodu směru vytlačení paliva, který není pevně stanoven. Přívod vzduchu ze všech stran zajišťuje vyšší účinnost spalování než u univerzálního samočistícího hořáku. Hořák je vhodný pro spalování hnědého a černého uhlí či dřevěných pelet. Tento typ hořáku se v dnešní době používá minimálně [45], [46].

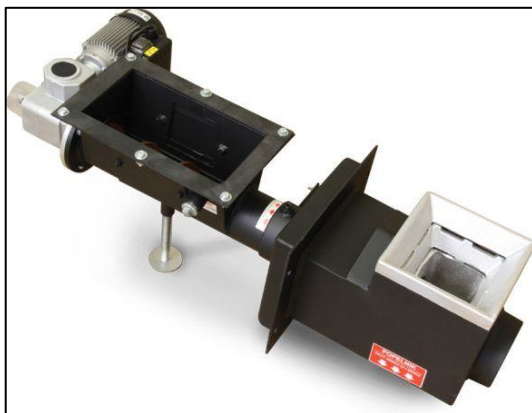


Obrázek 13: Retortový hořák [42]

8.3.3. Univerzální čtvercový hořák od firmy Kovarson

Univerzální čtvercový hořák od firmy Kovarson (obrázek 14) disponuje litinovou konstrukcí a garancí dokonalého spalování široké škály materiálů. Hořák lze použít na všech typech litinových kotlů na tuhá paliva a je vhodný zejména pro vytápění rodinných domů a středně velkých objektů. Základem hořáku je prodloužená hřídel, čtvercová komora a přívodní šneky, které mají otočené závity a tlačí proti sobě, čímž dochází k vytlačování paliva směrem nahoru, kde probíhá spalování. Popel a případný nedopal přepadává přes okraje do popelníku a technologie otočených šneků vytlačí spečence pryč z hořáku. Hořák je vhodný pro spalování sypkých paliv, agropellet a paliv, které se spékají či tečou. Přívod vzduchu ze čtyř stran směrem do středu čtvercové

komory má za následek vyšší účinnost spalování, než u hořáku retortového a univerzálního samočisticího. Hořák spaluje nejlépe hnědé a černé uhlí, dřevěné pelety, agropelety, štěpku, rostlinné materiály a dřevní odpad [45], [47].



Obrázek 14: Univerzální čtvercový hořák [42]

8.3.4. Hořák s pohyblivými deskami od firmy Verner

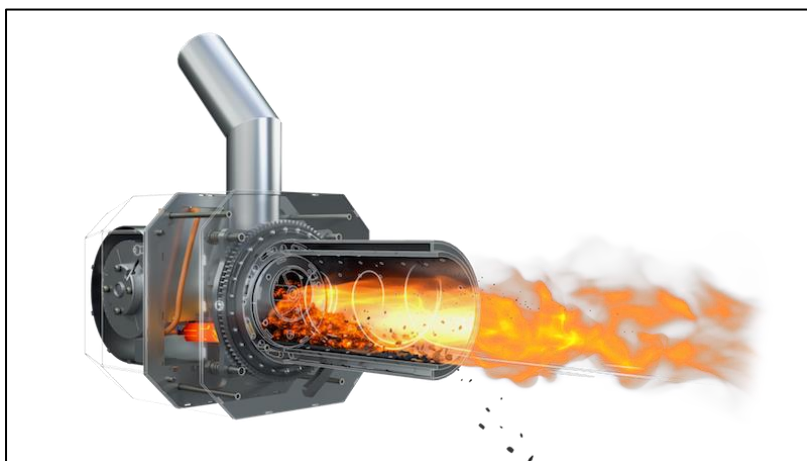
Hořák s pohyblivými deskami od slovenské firmy Verner (obrázek 15) umožňuje díky systému pohyblivých desek bezproblémově spalovat veškerá paliva, která mají tendenci se spékat. Pohyblivé desky rovněž zajišťují pohyb paliva na roštu, čímž dochází k dokonalému prohořívání paliva. Palivo je v kotli zapalováno díky automatickému horkovzdušnému systému. Přívod vzduchu potřebný pro spalování paliva je dodáván dvěma vícestupňovými přetlakovými ventilátory. Řídící jednotka hořáku dávkuje přesné dávky paliva a vzduchu do hořáku, díky snímání údajů o teplotě vody, spalin či teplotě okolí. Popel a případný nedopal je posouván pohybem desek až na konec hořáku, kde přepadává do popelníku [48].



Obrázek 15: Hořák s pohyblivými deskami [48]

8.3.5. Rotační hořák Blaze Harmony

Hořák s rotační spalovací komorou od firmy Blaze Harmony (obrázek 16) disponuje bezúdržbovým řešením spalování. Základem tohoto hořáku je rotační spalovací a provzdušňovací komora. Tento hořák funguje na principu pohybu paliva směrem ven z hořáku díky rotaci spalovací a provzdušňovací komory. Palivo se tak spaluje po celou dobu kontaktu se spalovací komorou, díky spirále, která víří plamen. Automatické čištění hořáku probíhá pomocí společného otáčení spalovací a provzdušňovací komory, popel a případný nedopal či spečence, tak míří ven z hořáku a přepadávají do popelníku. Rozdělení vzduchu na primární a sekundární vzduch zajišťuje vysokou účinnost spalování. Hořák je vhodný pro spalování všech typů pelet, dokonce i pelet nižší kvality a dalších různých druhů biomasy [49], [50].



Obrázek 16: Hořák s rotační komorou [50]

8.4. Výměníková část kotle

Výměníková část je důležitým prvkem pro přenos teplené energie. Přenos tepla zajišťuje výměník, který předává teplo z místa teplého, do místa chladného. Nás nejvíce budou zajímat výměníky pro teplovodní kotle, z důvodu použití tohoto typu kotle v praktické části práce. Teplovodní kotle jsou kotle, ze kterých se dostává horká voda. Výměníků tepla existuje celá řada a dělí se dle různých kritérií [2].

8.4.1. Rozdělení a typy výměníků

Rozdělení dle pracovního pochodu [2]:

- Rekuperační výměníky
- Regenerační výměníky
- Kontaktní výměníky
- Směšovací výměníky

Rozdělení dle účelu a použití [2]:

- Ohříváky
- Chladiče
- Výparníky
- Kondenzátory
- Přehříváky
- Sušárny
- Topná tělesa

Rozdělení dle způsobu přenosu tepla [2]:

- Konvekční
- Sálavé
- Kombinované

Rozdělení dle smyslu směru proudění [2]:

- Souproudé
- Protiproudé
- Křížové
- S kombinovaným prouděním

9. Normy a předpisy pro provoz kotlů

9.1. Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší

Zákon o ochraně ovzduší se zaměřuje zejména na zlepšení kvality ovzduší a ochranu obyvatel před emisní zátěží v České republice. Tento zákon se zaměřuje zejména na požadavky tuhých a kapalných paliv, ověřování a osvědčování kvality paliva či další poplatky spojené se znečišťováním. Zákon o ochraně ovzduší má celkem 9 částí, a to úvodní ustanovení, znečištění a znečišťování, nástroje ke snižování úrovně znečištění a znečišťování, povinnosti osob a kritéria udržitelnosti biopaliv, opatření k nápravě a přestupky, výkon státní správy a činnosti na podporu výkonu státní správy, přechodné režimy pro spalovací stacionární zdroje, zrušovací ustanovení, účinnost [51].

Tabulka 7: Minimální emisní požadavky na spalovací stacionární zdroje na pevná paliva [51]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon v kW	Mezní hodnoty emisí		
			CO	OGC	TZL
			mg · m ⁻³		
Samočinná	Biologické	≤ 65	3000	100	150
		> 65 až 187	2500	80	150
		> 187 až 300	1200	80	150
	Fosilní	≤ 65	3000	100	125
		> 65 až 187	2500	80	125
		> 187 až 300	1200	80	125

Tabulka 8: Znečišťující látky, které podléhají zpoplatnění a poplatkům za znečišťování v jednotlivých letech (Kč/t) [51]

	2017	2018	2019	2020	2021 a dále
TZL	6300	8400	10500	12600	14700
SO₂	2100	2800	3500	4200	4900
NO_x	1700	2200	2800	3300	3900

9.2. Norma ČSN EN 303-5

Norma ČSN EN 303-5 je Evropská norma, platná pro kotle na pevná paliva pro ústřední vytápění do jmenovitého tepelného výkonu nejvýše 500 kW. Tato norma však neplatí pro kotle, které byly zkoušeny před datem vydání této normy. Norma pojednává o rozdělení paliv, požadavcích na konstrukci kotle, typech jednotlivých zkoušek kotle, protokolech o zkoušce, bezpečnosti, a hlavně emisních limitů. Norma zařazuje celkem 3 třídy mezních hodnot emisí a to třídu 3, 4 a třídu 5. Pro jednotlivé třídy kotlů se taktéž stanovují účinnosti kotle. Tato norma neplatí pro NO_x . [39].

$$\eta_k = 87 + \log Q \quad [\%] \quad \text{pro třídu 5 a } Q < 100 \text{ kW} \quad (9.1)$$

$$\eta_k = 80 + 2 \cdot \log Q \quad [\%] \quad \text{pro třídu 4 a } Q < 100 \text{ kW} \quad (9.2)$$

$$\eta_k = 67 + 6 \cdot \log Q \quad [\%] \quad \text{pro třídu 3 a } Q < 300 \text{ kW} \quad (9.3)$$

kde:

η_k účinnost kotle [%]

Q tepelný výkon kotle [kW]

Tabulka 9: Mezní hodnoty emisí [39]

Dodávka paliva	palivo	Jmenovitý tepelný výkon	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			TZL		
			mg · m ⁻³ při 10 % O ₂								
		kW	Třída			Třída			Třída		
3	4		5	3	4	5	3	4	5		
samočinná	Biopaliva	≤ 50	3000	1000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50-150	2500			80			150		
		> 150-500	1200			80			150		
	Fosilní paliva	≤ 50	3000			100			125		
		> 50-150	2500			80			125		
		> 150-500	1200			80			125		

9.3. Směrnice o Ekodesignu 2009/125/ES

Směrnice Evropského parlamentu a rady 2009/125/ES na ekodesign kotlů na tuhá paliva stanovuje požadavky na provoz domácích topidel se jmenovitým výkonem do 50 kW a kotlů se jmenovitým výkonem do 120 kW. Směrnice stanovuje požadavky na provoz kotlů pořízených před vydáním Ekodesignu a požadavky na emisní limity pro nově pořízené kotle. Od 1. 1. 2020 bude možno legálně zakoupit a uvádět do provozu pouze kotle 5. emisní třídy dle normy ČSN EN 303-5. Tato směrnice, na rozdíl od normy ČSN EN 303-5 platí i pro NO_x. Tato směrnice však prozatím neplatí pro kotle na nedřevní biomasu, z důvodu nedostatku celoevropských informací pro určení vhodných úrovní pro požadavky na Ekodesign. V budoucnu se předpokládá stanovení požadavků na Ekodesign i pro nedřevní biomasu [52], [53].

Tabulka 10: Povinnosti související s prodejem a provozem kotlů na tuhá paliva [52], [53]

Zahájení platnosti	Popis nařízení
1.1.2014	Zákaz prodeje kotlů 1. a 2. emisní třídy, zakoupit a uvést do provozu lze pouze kotle 3., 4. a 5. emisní třídy
1.1.2017	Povinnost předložit revizi kotle s označením emisní třídy
1.1.2018	Zákaz prodeje kotlů 3. emisní třídy, zakoupit a uvést do provozu lze pouze kotle 4. a 5. emisní třídy
1.1.2020	Zákaz prodeje kotlů 4. emisní třídy, zakoupit a uvést do provozu lze pouze kotle 5. emisní třídy
1.1.2022	Zákaz používání kotlů 1. a 2. emisní třídy, bez ohledu na datum pořízení

Tabulka 11: Hodnoty emisních limitů pro kotle na tuhá paliva [52], [53]

Dodávka paliva	Palivo	Mezní hodnoty emisí a účinnosti					
Samočinná		TZL	OGC	CO	NO _x	účinnost	
		mg · m ⁻³				%	
		Biologické	40	20	500	200	77
		Fosilní	-	-	-	350	-

10. Měření emisí na malých zdrojích znečištění

Pro měření emisí byl použit automatický kotel na tuhá paliva s názvem kotel 1 a palivo s názvem agropalivo 1. Z důvodu stále probíhajícího výzkumu kotle a paliva bohužel není možno uvést jejich skutečné názvy a některé zásadní hodnoty. Celkem se provedla 2 měření. Pro první měření byl použit kotel 1 s přepážkou a vysunutým hořákem z čelní strany (obrázek 17 vlevo). Pro druhé měření byl použit kotel 1 bez přepážky a hořákem z boční strany (obrázek 17 vpravo), tento typ uspořádání je úspornější na místo. Pro všechna měření byl v kotli namontován hořák s pohyblivými deskami. Cílem obou měření bylo stanovit koncentraci tuhých znečišťujících látek (TZL), plynných znečišťujících látek (CO , NO_x , OGC). Měření byla provedena pro agropalivo 1 a dřevní pelety, aby mohlo dojít k následnému porovnání výsledků. Začátek každého měření probíhal přibližně po 4 hodinách od zápalu kotle, z důvodu postupného zatěžování kotle, kolísání a následnému ustálení všech měřených hodnot.



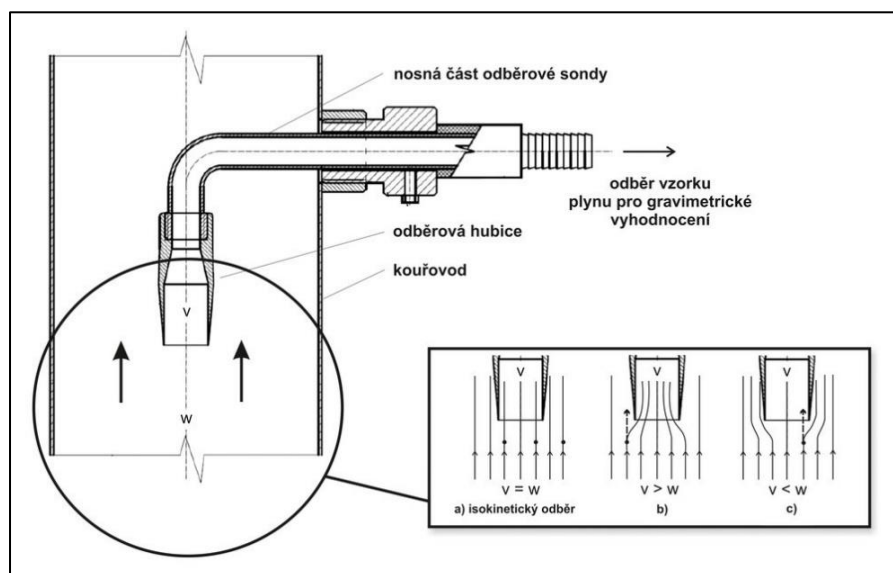
Obrázek 17: Kotel 1 s přepážkou a vysunutým hořákem z čelní strany (vlevo), kotel 1 bez přepážky a hořákem z boční strany (vpravo)

Tabulka 12: Štítek s parametry kotle 1

Jmenovitý tepelný výkon	25 kW
Nejvyšší dovolená provozní teplota	85 °C
Nejvyšší dovolený provozní tlak	2 bar
Obsah vody	85 l
Elektrický příkon	101 W
Třída paliva	Hnědě uhlí – b(ořech2), pelety C1
Třída kotle dle ČSN EN 303-5	5
Účinnost kotle	92,5 %

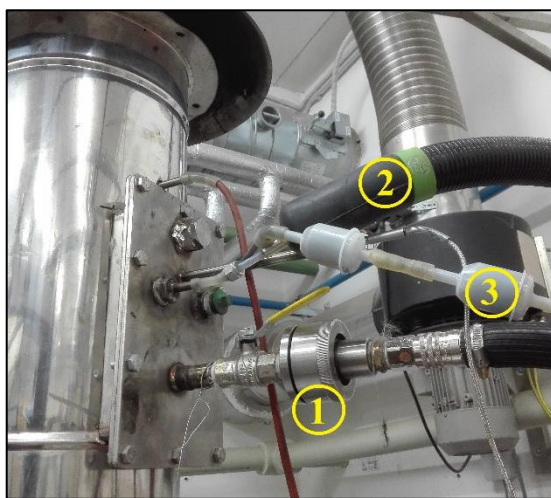
10.1. Stanovení koncentrace tuhých a plyných znečišťujících látek

Koncentrace tuhých znečišťujících látek byla stanovena pomocí přímého odběru vzorku z kouřovodu na základě gravimetrické metody. Gravimetrická metoda spočívá v zachycení částic na filtr umístěný za odběrovou sondou, která je vložena v kouřovodu. Množství zachyceného prachu se zjistí pomocí rozdílu mezi hmotností filtru před odběrem a po odběru. Gravimetrická metoda vyžaduje isokinetický odběr, tj. stejnou rychlost odebíraného vzorku v ústí trubice s rychlostí spalin. [54].

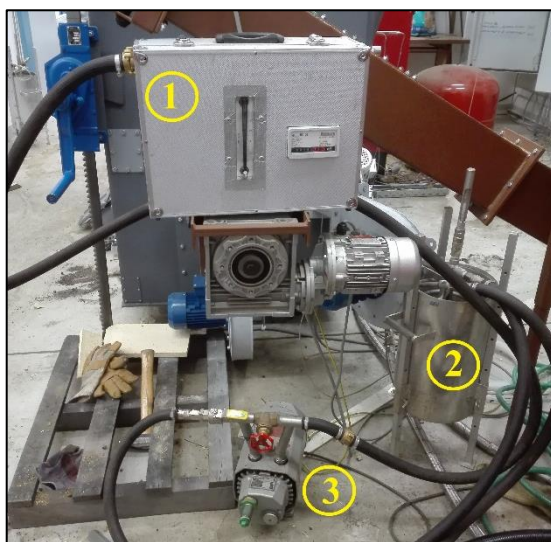


Obrázek 18: Schéma přímého odběru vzorku spalin z kouřovodu gravimetrickou metodou [54]

K samotnému stanovení koncentrace TZL a plynných znečišťujících látek je zapotřebí specifického zapojení všech používaných přístrojů. Celkem byly z kouřovodu vyvedeny 3 odběrové trasy (obrázek 19). První trasa slouží pro odběr TZL a začíná v odběrové trubici. Následně spaliny procházejí přes filtr umístěný ve vytápěném zachycovači tuhých látek. Na filtru se zachytí prachové částice. Spaliny se v dalším kroku dostávají do kondenzátoru, kde voda ve spalínách kondenzuje, dále následuje vývěva a objemový průtokoměr, ve kterém je změřeno odebrané množství spalin (obrázek 20). Koncentrace TZL ve spalínách je zjištěna pomocí hmotnosti zachyceného prachu na filtru a množství odebraných spalin. Další důležitá data jako je výkon kotle, tlak a teplota spalin apod., jsou stanoveny a zaznamenávány pomocí počítače v řídicím centru.



Obrázek 19: Odběrové trasy, měření TZL (1), měření OGC (2), měření plynných znečišťujících látek (3)



Obrázek 20: Objemový průtokoměr (1), kondenzátor (2), vývěva (3)



Obrázek 21: Ukázka měření pomocí počítače v řídicím centru

Druhá trasa slouží pro odběr OGC, kde jsou spaliny vedeny otápeným vedením přes filtr přímo do měřicího přístroje Testa FID 2010 T (obrázek 28 vpravo). Třetí trasa slouží pro odběr CO, NO_x a O₂, kde spaliny prochází přes chladicí box do čerpadla a následně do analyzátoru spalín Siemens ultramat 23 (obrázek 28 vlevo).



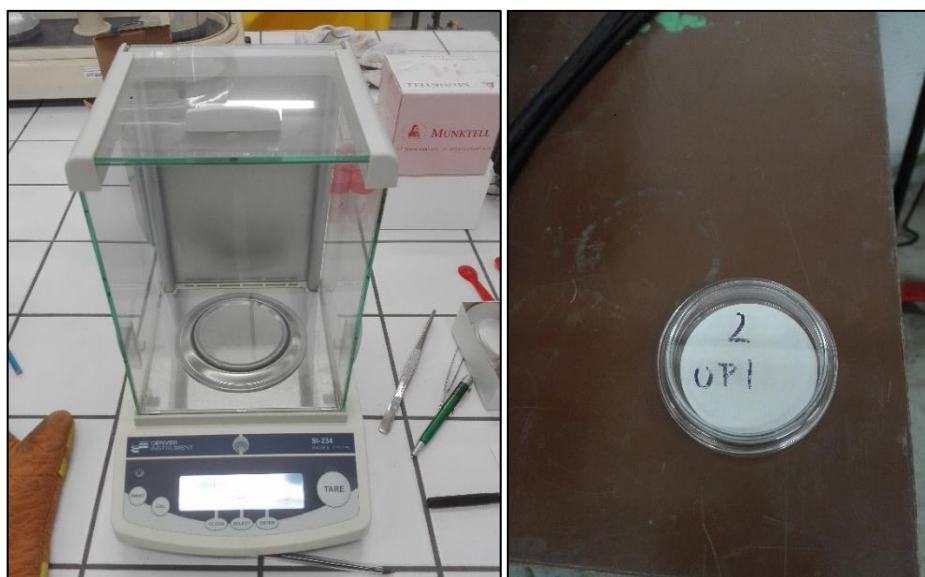
Obrázek 22: Siemens ultramat 23 (vlevo), Testa FID 2010 T (vpravo)

10.1.1. Příprava před měřením

Před samotným měřením byla provedena kontrola spalovacího zařízení, naplnění zásobníku agropalivem 1 a následný zápal. Použité filtry nejprve prošly procesem sušení v sušičce Venticell LSIK/VC111 (obrázek 23 vlevo), kde setrvaly přibližně 1 hodinu při teplotě 110 °C. Po dokončení sušení filtry byly vloženy do exsikátoru (obrázek 23 vpravo), kde se stabilizovala jejich teplota a vlhkost. Následně se použité filtry zvážily na laboratorní váze Ohaus EP114C (obrázek 24 vlevo), vážení filtrů proběhlo s miskou i bez misky. Na konci celého procesu byl každý filtr řádně označen.



Obrázek 23: Sušička Venticell LSIK/VC111 (vlevo), Exsikátor (vpravo)



Obrázek 24: Laboratorní váha Ohaus EP114C (vlevo), filtr s miskou použitý při měření (vpravo)

10.1.2. Průběh měření

Po dokončení veškeré přípravy filtrů a spalovacího zařízení mohl začít samotný odběr vzorku. Doba každého odběru byla stanovena na 30 minut. Při každém odběru byly provozní hodnoty a informace z měřicích přístrojů řádně zapisovány do tabulky. Jak již bylo zmíněno v kapitole 10.1, odebírání vzorku probíhalo přímým odběrem z kouřovodu na základě gravimetrické metody. Hodnoty rychlosti a vlhkosti spalin byly měřeny pomocí multifunkčního analyzátoru s vyměnitelnými sondami.



Obrázek 25: Palivo použité při měření (vlevo), filtr s odebraným vzorkem (vpravo)

10.1.3. Přepočítání na referenční kyslík

Pro správné vyhodnocení plynných emisí je důležité přepočítat zaznamenané koncentrace jednotlivých složek na stanovené jednotky a referenční kyslík (rovnice 10.1).

$$X_{\text{ref}} = X_{\text{real}} \cdot \frac{20,9 - O_{2\text{ref}}}{20,9 - O_{2\text{real}}} [\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (10.1)$$

kde:

X_{ref} referenční hodnoty (CO , NO_x , TZL , OGC) [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$]

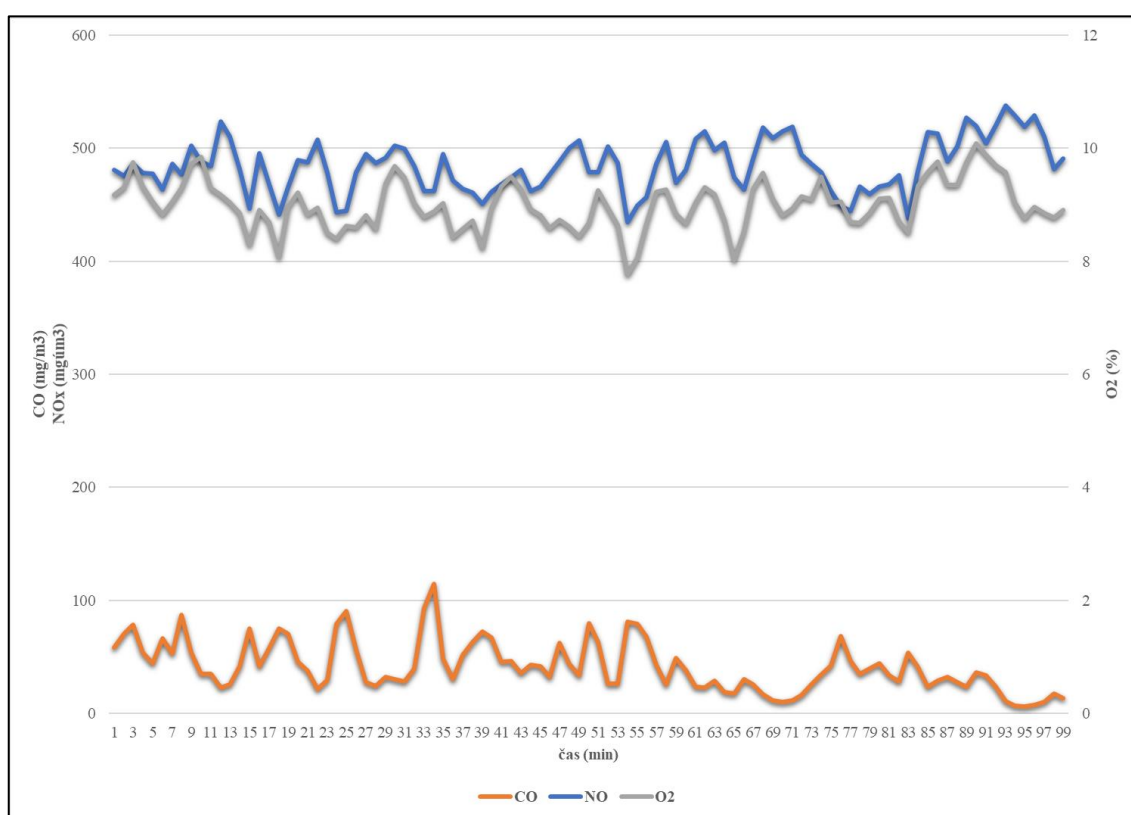
X_{real} naměřené hodnoty (CO , NO_x , TZL , OGC) [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$]

$O_{2\text{ref}}$ referenční hodnota kyslíku (10 %) [%]

$O_{2\text{real}}$ naměřená hodnota kyslíku [%]

10.2. Vyhodnocení měření 1

Při prvním měření byly provedeny celkem 3 odběry. Při průběhu odběrů nenastaly žádné komplikace a měření probíhalo bez závažnějších problémů. Jak lze vidět v grafu 5, všechny hodnoty mají průběh bez větších výchylek. Všechny hodnoty, kromě kyslíku byly přepočteny na referenční obsah kyslíku. Koncentrace TZL je uvedena jako suché spaliny za normálních podmínek a referenčním obsahu kyslíku. Normální podmínky nastávají při tlaku $p = 101325 \text{ Pa}$ a teplotě $T = 273,15 \text{ K}$. Pro jednotlivé odběry byly stanoveny parametry kotle a hořáku (tabulka 13) a vypočteny průměrné koncentrace znečišťujících látek (tabulka 14).



Graf 5: Závislost CO, NO_x a O₂ na čase pro agropalivo 1 při průběhu odběrů, měření 1

Tabulka 13: Časy odběrů a nastavení kotle při průběhu měření 1

	Začátek odběru	Konec odběru	Délka odběru	Práce podavače	Prostoj podavače	Čištění (chod)	Čištění (pauza)
	[hh:mm]	[hh:mm]	[min]	[s]	[s]	[s]	[s]
1. odběr	13:10	13:40	30	1,5	10	32	32
2. odběr	13:43	14:13	30	1,4	10	32	32
3. odběr	14:16	14:46	30	1,4	10	32	32

Tabulka 14: Koncentrace tuhých a plyných znečišťujících látek, měření 1

	CO	NO _x	O ₂	TZL	OGC	Výkon
	[mg · m ⁻³]	[mg · m ⁻³]	[%]	[mg · m ⁻³]	[mg · m ⁻³]	[kW]
1. odběr	50,246	481,230	9,012	54,349	1,965	15,79
2. odběr	48,099	478,369	8,819	52,093	1,793	16,03
3. odběr	27,995	494,085	9,206	46,466	1,368	15,94
Průměr	42,113	484,651	9,011	50,969	1,709	15,92

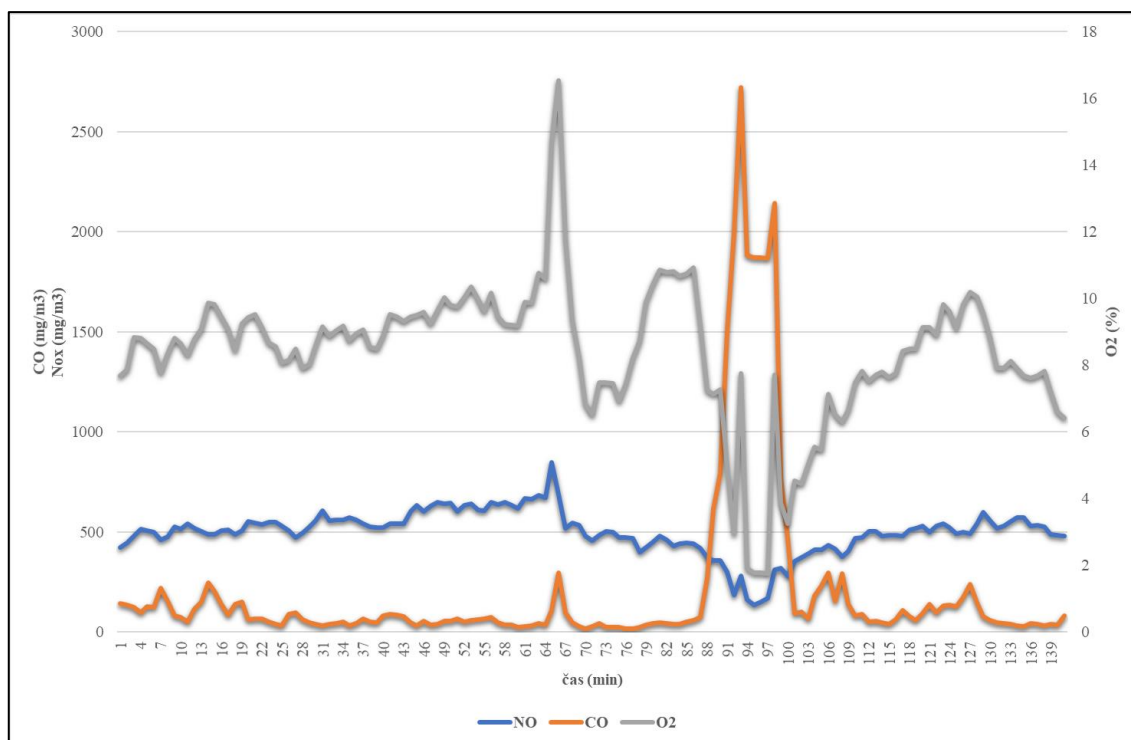
10.3. Vyhodnocení měření 2

Při druhém měření byly provedeny celkem 4 odběry. Při průběhu odběrů nastaly komplikace a celé měření provázely problémy. Při prvních dvou odběrech správně nefungoval přístroj Testa FID 2010 T pro měření OGC. V tabulce 15 jsou proto první 2 hodnoty pro OGC prázdné. Při prvním odběru taktéž vyskočila vysoko hodnota CO. V průběhu třetího odběru došlo ke spečení agropaliva 1 na konci hořáku, vytvoření spečence (obrázek 26), který blokoval průchod popele a nedopalu do popelníku. Následkem bylo postupné ucpávání hořáku, vysoké a kolísavé hodnoty všech měřených koncentrací (graf 6). Problém začal po 67 minutách od začátku měření a trval přibližně 35 minut, než se hodnoty opět ustálily. Tento odběr trval pouze 10 minut a následovalo odstranění spečence a vyčištění hořáku a popelníku. Vysoká koncentrace CO v tomto intervalu byla způsobena otevřením dvířek kotle při čištění. Poslední měření probíhalo bez problémů. Všechny hodnoty, kromě kyslíku byly přepočteny na referenční obsah kyslíku. Koncentrace TZL je uvedena jako suché spaliny za normálních podmínek

a referenčním obsahu kyslíku. Normální podmínky nastávají při tlaku $p = 101325 \text{ Pa}$ a teplotě $T = 273,15 \text{ K}$. Pro jednotlivé odběry byly stanoveny parametry kotle a hořáku (tabulka 15) a vypočteny průměrné koncentrace znečišťujících látek (tabulka 16).



Obrázek 26: Tvorba spečence a jazyku na konci hořáku (vlevo), ukázka spečence (vpravo)



Graf 6: Závislost CO, NO_x a O₂ na čase pro agropalivo 1 při průběhu odběrů, měření 2

Tabulka 15: Časy odběrů a nastavení kotle při průběhu měření 2

	Začátek odběru	Konec odběru	Délka odběru	Práce podavače	Prostoj podavače	Čištění (chod)	Čištění (pauza)
	[hh:mm]	[hh:mm]	[min]	[s]	[s]	[s]	[s]
1. odběr	12:40	13:10	30	1,4	10	32	32
2. odběr	13:12	13:42	30	1,4	10	32	32
3. odběr	14:00	14:10	10	1,4	10	32	32
4. odběr	14:30	15:00	30	1,4	10	32	32

Tabulka 16: Koncentrace tuhých a plyných znečišťujících látek, měření 2

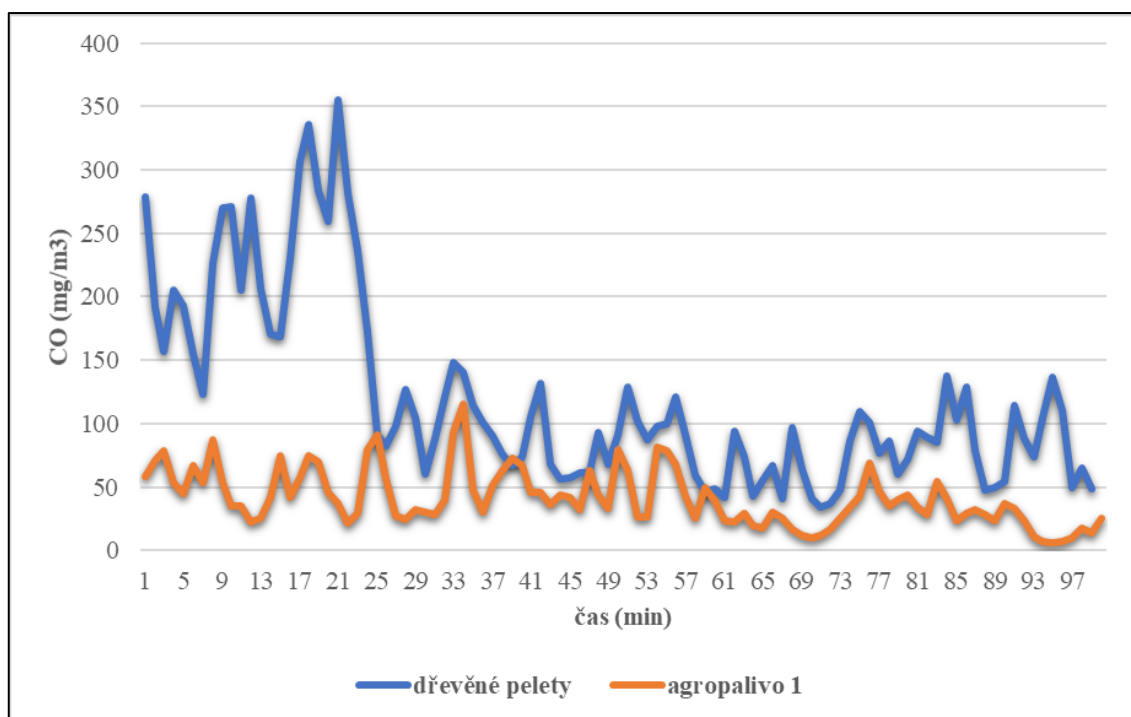
	CO	NO_x	O₂	TZL	OGC	Výkon
	[mg · m ⁻³]	[mg · m ⁻³]	[%]	[mg · m ⁻³]	[mg · m ⁻³]	[kW]
1. odběr	104,036	509,557	8,703	80,244	-	17,73
2. odběr	51,774	599,605	9,465	46,532	-	16,82
3. odběr	304,188	406,654	9,321	48,034	187,292	13,99
4. odběr	75,092	517,015	8,386	50,384	3,068	18,63
Průměr	133,772	508,283	8,969	56,298	95,180	16,79

11. Porovnání výsledků dřevních pelet s agropalivem 1

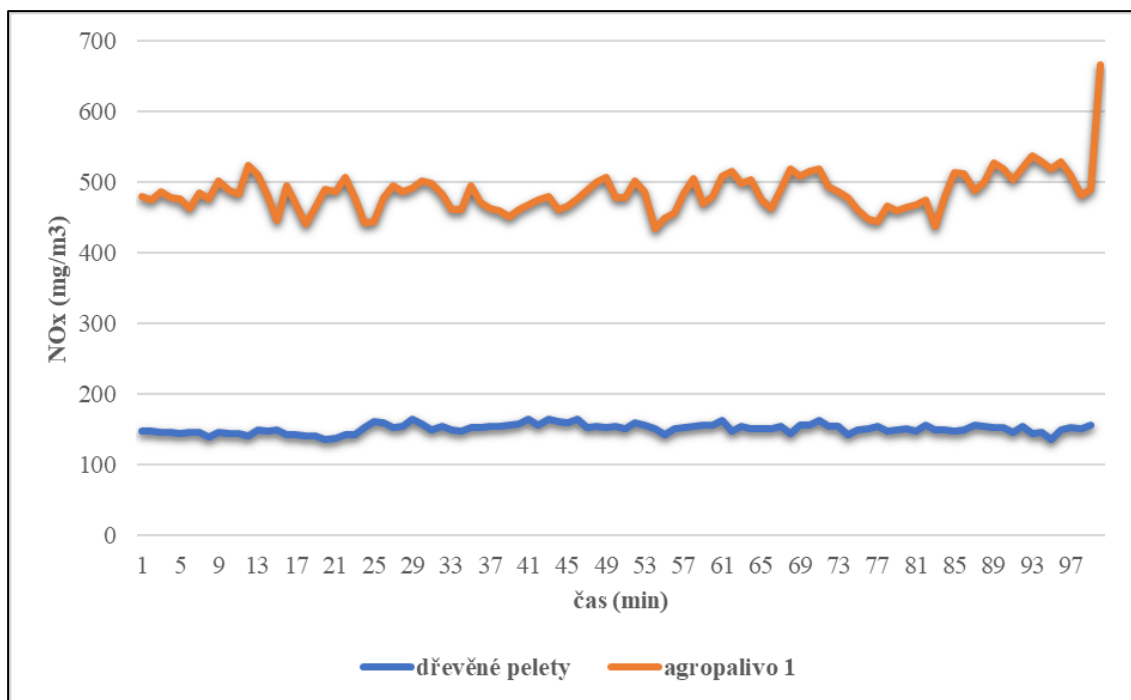
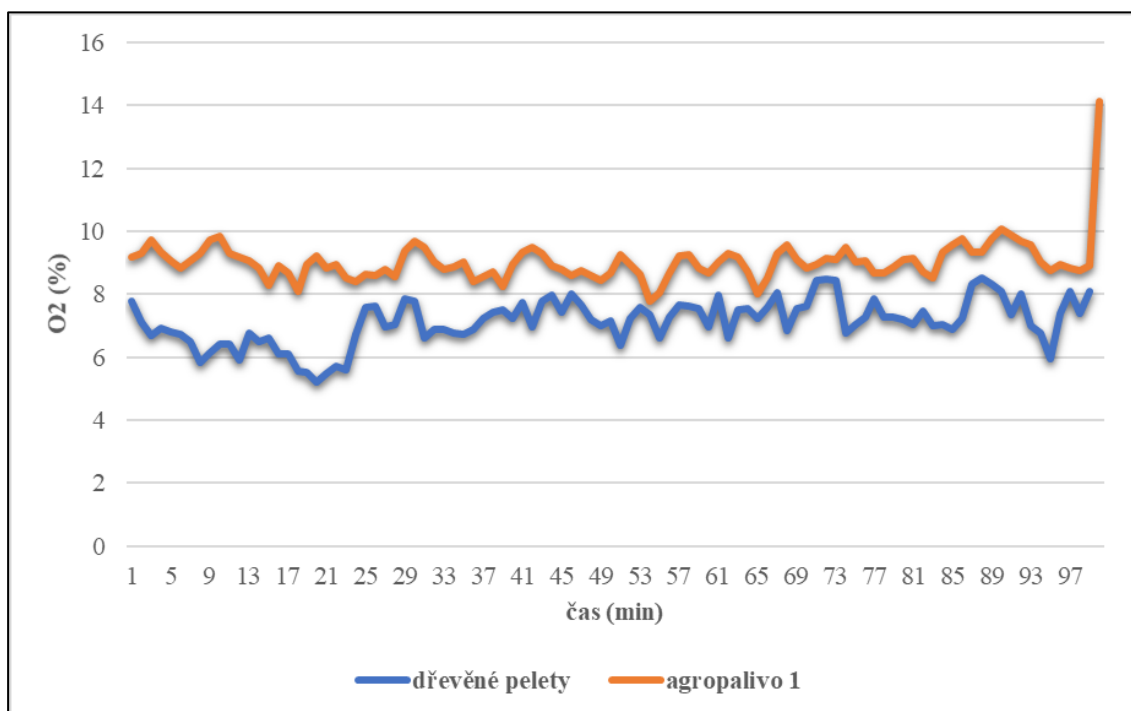
11.1. Porovnání výsledků měření 1

Koncentrace CO je vyšší u dřevních pelet, hlavně při prvních 25 minutách testu, ale z grafu 7 lze vidět, že tyto hodnoty mají podobný průběh pro obě paliva. Koncentrace NO_x je přibližně 3x vyšší u agropaliva 1, kde lze také pozorovat větší kolísání hodnot v průběhu celého testu (graf 8). Průměrná koncentrace kyslíku je pro obě paliva velmi podobná. Z grafu 9 lze vyčíst minimální odchylky při průběhu celého měření.

Při stanovení koncentrace tuhých a plyných znečišťujících látek pro dřevní pelety nedošlo ke kompletnímu doladění kotle 1 na nejlepší dosahované hodnoty, z důvodu časové náročnosti každého testu, a proto koncentrace TZL při tomto měření překračuje limitní hodnotu (tabulka 17). Lze předpokládat, že by koncentrace TZL neměla přesáhnout $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, jestliže je kotel 1 certifikován pro dřevní pelety do třídy 5 dle ČSN EN 303-5.



Graf 7: Srovnání naměřených koncentrací CO pro dřevní pelety a agropalivo 1, měření 1

Graf 8: Srovnání naměřených koncentrací NO_x pro dřevní pelety a agropalivo 1, měření 1Graf 9: Srovnání naměřených koncentrací O₂ pro dřevní pelety a agropalivo 1, měření 1

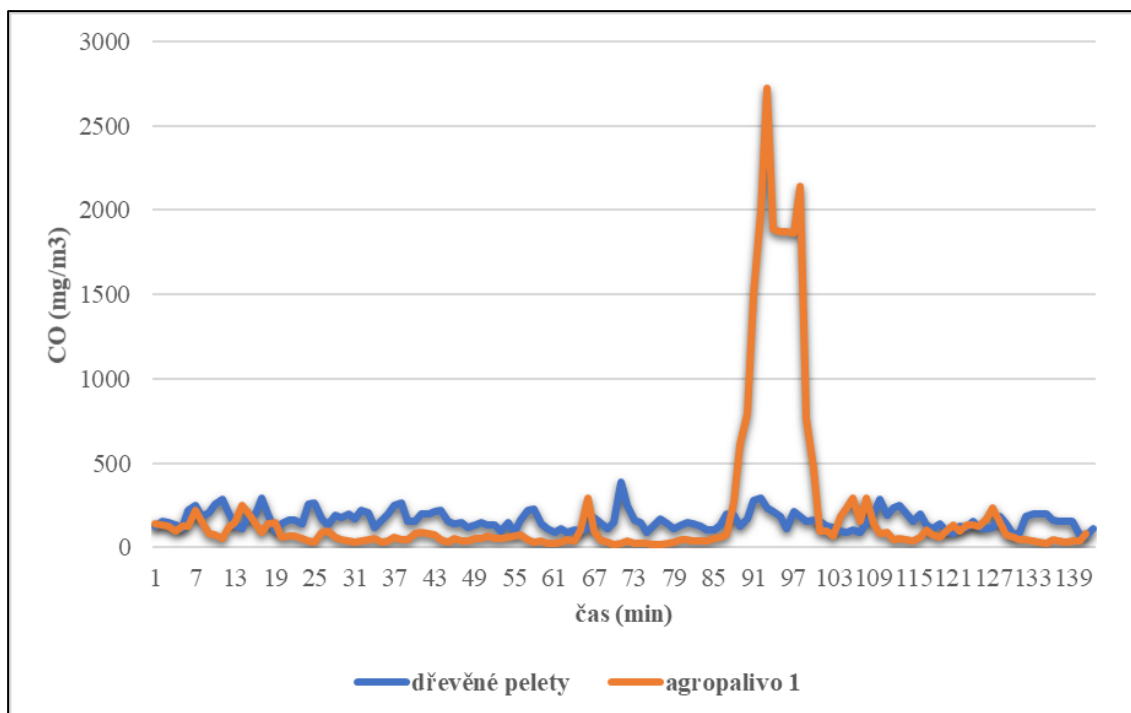
Tabulka 17: Srovnání průměrných naměřených koncentrací tuhých a plyných znečišťujících látek, měření 1

	CO	NO _x	O ₂	TZL
	[mg · m ⁻³]	[mg · m ⁻³]	[%]	[mg · m ⁻³]
Dřevěné pelety	86,141	151,170	7,385	61,146
Agropalivo 1	42,113	484,561	9,011	50,969

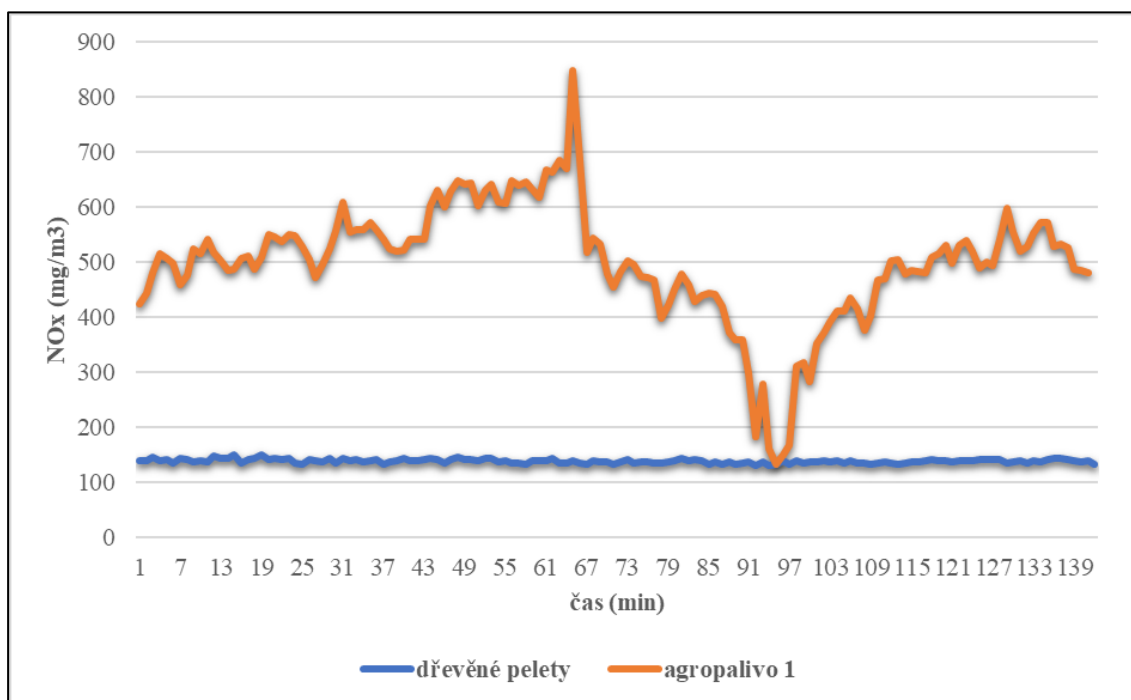
11.2. Porovnání výsledků měření 2

Při pohledu na grafy 10, 11 a 12 porovnávaných koncentrací plyných znečišťujících látek lze pozorovat velké odchylky při celém průběhu měření. Tyto odchylky byly způsobeny problémy při měření, jak již bylo řečeno v kapitole 10.3. Koncentrace CO je opět vyšší u dřevních pelet, ale má velmi podobný průběh jako agropalivo 1 (graf 10), prudký nárůst CO u agropaliva 1 po 85 minutách měření byl způsoben otevřením dvířek kotle a čištěním hořáku, jak již bylo řečeno v kapitole 10.3. Průběh koncentrace NO_x pro dřevní pelety je konstantní s minimálními odchylkami. Totéž však neplatí pro agropalivo 1, kde koncentrace NO_x dosahuje výrazně vyšších hodnot a kolísání při průběhu testu (graf 11). Koncentrace kyslíku se opět liší minimálně, ale z grafu 12 lze vidět velké kolísání hodnot uprostřed měření. Toto kolísání způsobily problémy se spékáním paliva v hořáku při průběhu testu.

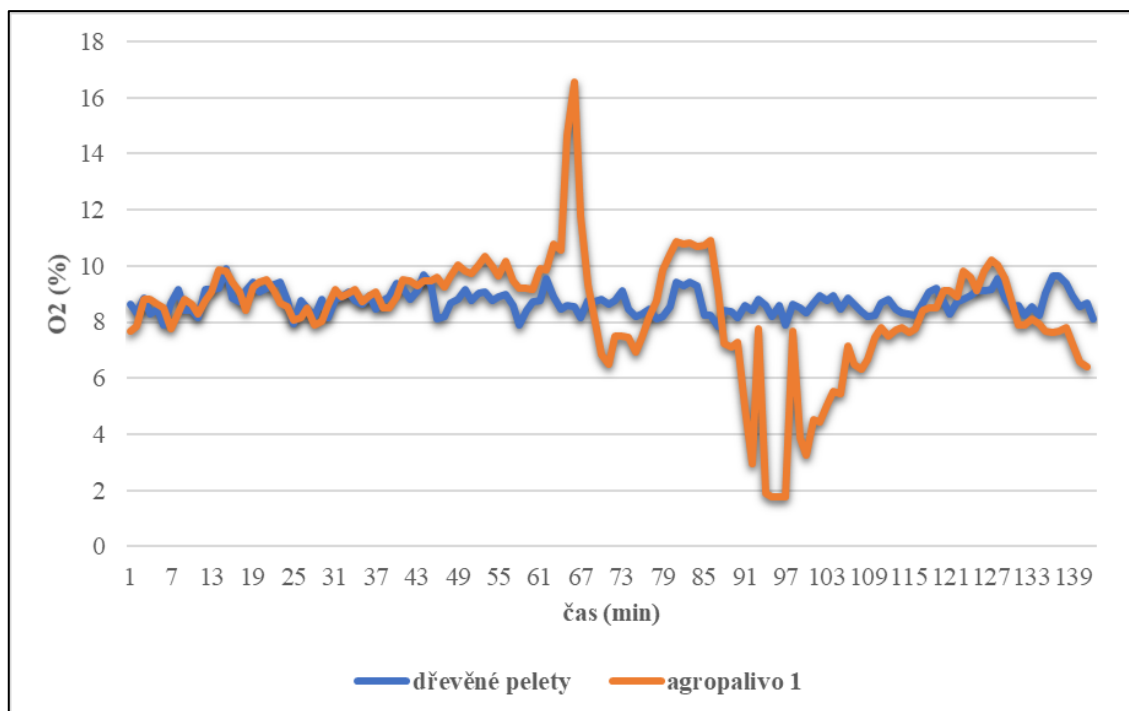
Koncentrace TZL pro dřevní pelety nepřekračuje limitní hodnotu třídy 5 dle ČSN EN 303-5, což bylo způsobeno doladěním kotle 1 na nejlepší dosahované hodnoty (tabulka 18).



Graf 10: Srovnání naměřených koncentrací CO pro dřevní pelety a agropalivo 1, měření 2



Graf 11: Srovnání naměřených koncentrací NOx pro dřevní pelety a agropalivo 1, měření 2

Graf 12: Srovnání naměřených koncentrací O₂ pro dřevěné pelety a agropalivo 1

Tabulka 18: Srovnání průměrných naměřených koncentrací tuhých a plyných znečišťujících látek

	CO	NO _x	O ₂	TZL
	[mg · m ⁻³]	[mg · m ⁻³]	[%]	[mg · m ⁻³]
Dřevěné pelety	158,000	138,800	8,730	34,900
Agropalivo 1	133,772	508,283	8,969	56,298

12. Vyhodnocení výsledků

Při prvním měření přesáhly limitní hodnoty emisí dle ČSN EN 303-5 pouze TZL (tabulka 19), kde však lze předpokládat, že u dřevních pelet nebyl kotel 1 vyladěn na nejlepší dosahované hodnoty, jak již bylo řečeno v kapitole 10.1. Kotel 1 tak při prvním měření spadá díky hodnotám TZL do třídy 3 pro dřevní pelety a třídy 4 pro agropalivo 1. Ekodesign při prvním měření nesplňuje kotel 1 pro dřevní pelety z důvodu předcházejícího odůvodnění. Kdyby se agropelety porovnávaly dle stávajícího Ekodesignu pro dřevní pelety, byly by překročeny koncentrace TZL asi o $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ a koncentrace NO_x přibližně o $284 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, což představuje dvojnásobek limitu (tabulka 20).

Tabulka 19: Porovnání dřevních pelet a agropaliva 1 s normou ČSN EN 303-5 pro měření 1

	CO	TZL	OGC
	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ČSN EN 303-5 třída 5	500	40	20
Dřevní pelety	86,141	61,146	-
Agropalivo 1	42,113	50,969	1,709

Tabulka 20: Porovnání dřevních pelet a agropaliva 1 s normou o Ekodesignu pro měření 1

	CO	NO_x	TZL	OGC
	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$
Ekodesign	500	200	40	20
Dřevní pelety	86,141	151,170	61,146	-
Agropalivo 1	42,113	484,561	50,969	1,709

Při druhém měření kotel 1 na dřevní pelety splňuje emisní třídu 5 a zároveň ekodesign (tabulka 21). To odpovídá i certifikaci kotle 1 pro toto palivo. Při spalování agropaliva 1 došlo k velkému překročení limitní hodnoty OGC dle ČSN EN 303-5, což však bylo způsobeno problémy při tomto měření, a proto je tato hodnota zavádějící. Kotel 1 spadá do třídy 4 pro agropalivo 1, z důvodu překročení limitní hodnoty TZL. Hodnotu OGC zde budeme brát jako nesprávnou a budeme se řídit hodnotou z tabulky 19. Kdyby se agropelety porovnávaly dle stávajícího Ekodesignu pro dřevní pelety, byly by překročeny koncentrace TZL asi o $16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ a koncentrace NO_x přibližně o $308 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, což představuje skoro trojnásobek limitu (tabulka 22).

Tabulka 21: Porovnání dřevních pelet a agropaliva 1 s normou ČSN EN 303-5 pro měření 2

	CO	TZL	OGC
	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ČSN EN 303-5 třída 5	500	40	20
Dřevní pelety	158,000	34,900	-
Agropalivo 1	133,772	56,298	95,180

Tabulka 22: Porovnání dřevních pelet a agropaliva 1 s normou o Ekodesignu pro měření 2

	CO	NO_x	TZL	OGC
	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$
Ekodesign	500	200	40	20
Dřevní pelety	158,000	138,800	34,900	-
Agropalivo 1	133,772	508,283	56,298	95,180

13. Metody výpočtu účinnosti kotle

Účinnost kotle se dle normy určuje přímou metodou (rovnice 13.1) a nepřímou metodou (rovnice 13.2).

13.1. Přímá metoda

U přímé metody se pro stanovení účinnosti kotle využívá poměru výkonu a příkonu kotle (rovnice 13.1) [2].

$$\eta_k = \frac{\text{výkon kotle}}{\text{příkon kotle}} = \frac{M_w \cdot (i_{w2} - i_{w1})}{Q_i \cdot M_{pv}} \cdot 100 [\%] \quad (13.1)$$

kde:

η_k účinnost kotle [%]

M_w hmotnostní tok vody kotlem [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

M_{pv} hmotnostní tok dodávaného paliva [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

i_{w2} entalpie ohřáté vody na výstupu z kotle [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

i_{w1} entalpie ohřáté vody na vstupu do kotle [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

13.2. Nepřímá metoda

U nepřímé metody se účinnost určuje pomocí jednotlivých ztrát kotle. Metodiku výpočtu určují normy ČSN EN 303-5 a ČSN EN 070240 [2], [38], [39], [55].

$$\eta_k = (1 - \sum Z_c - Z_{co} - Z_{sv} - Z_f - Z_k) \cdot 100 [\%] \quad (13.2)$$

kde:

η_k účinnost kotle [%]

Z_c ztráta mechanickým nedopalem [–]

Z_{co} ztráta chemickým nedopalem [–]

Z_{sv} ztráta sáláním a vedením tepla do okolí [–]

Z_f ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků [–]

Z_k ztráta citelným teplem spalin [–]

13.2.1. Ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cp} + Z_{cú} + Z_{cr} + Z_{cb} [-] \quad (13.3)$$

kde:

Z_c ztráta mechanickým nedopalem ve škváře nebo strusce [-]

Z_{cs} ztráta nedopalem v popílku [-]

$Z_{cú}$ ztráta nedopalem v úletu [-]

Z_{cr} ztráta nedopalem v roštovém propadu [-]

Z_{cb} ztráta uhelným práškem v brýdách [-]

$$Z_{ci} = \frac{C_i}{1-C_i} \cdot X_i \cdot \frac{A^r}{Q_i^r} \cdot Q_{ci} [-] \quad (13.4)$$

kde:

Z_{ci} ztráta v uvažovaném druhu tuhých zbytků [-]

C_i obsah uhlíku v uvažovaném druhu tuhých zbytků [-]

X_i podíl hmotnosti popele v uvažovaném druhu tuhých zbytků [-]

A_r obsah popela v palivu [-]

Q_i^r výhřevnost paliva [kJ · kg⁻¹]

Q_{ci} průměrná hodnota výhřevnosti, $Q_{ci} = 32\,600 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

13.2.2. Ztráta chemickým nedopalem

$$Z_{co} = (1 - Z_c) \cdot \frac{V_{ss} \cdot (\omega_{CO} \cdot Q_{CO}^r + \omega_{H_2} \cdot Q_{H_2}^r + \omega_{CH_4} \cdot Q_{CH_4}^r)}{Q_i^r} [-] \quad (13.5)$$

kde:

Z_{co} ztráta chemickým nedopalem [-]

Z_c ztráta mechanickým nedopalem [-]

V_{ss} objem suchých spalín na 1 kg paliva [m³ · kg⁻¹]

ω_i objemový podíl nespáleného plynu [-]

Q_i^r výhřevnost paliva jednotlivých složek nespáleného plynu [kJ · kg⁻¹]

13.2.3. Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

$$Z_{sv} = \frac{\Lambda_H \cdot \sum S_{Hi} \cdot (t_i - t_m) + \Lambda_V \cdot \sum S_{Vi} \cdot (t_i - t_m)}{P_P} [-] \quad (13.6)$$

kde:

Z_{sv} ztráta sáláním a vedením tepla [-]

Λ_H součinitel přestupu tepla z vnějšího vodorovného povrchu kotle do okolního prostředí [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

S_{Hi} plošný obsah vnějšího vodorovného povrchu kotle [m^2]

t_i průměrná teplota vnějšího povrchu kotle [$^{\circ}C$]

t_m teplota okolního prostředí [$^{\circ}C$]

Λ_V součinitel přestupu tepla z vnějšího svislého povrchu kotle do okolního prostředí [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

S_{Vi} plošný obsah vnějšího svislého povrchu kotle [m^2]

P_P tepelný příkon kotle [W]

13.2.4. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = \frac{A_r}{Q_i^r} \cdot \frac{X_i \cdot i_i}{1 - C_i} [-] \quad (13.7)$$

kde:

Z_f ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků [-]

A_r obsah popela v palivu [-]

Q_i^r výhřevnost paliva [$kJ \cdot kg^{-1}$]

X_i podíl hmotnosti popele v tuhých zbytcích [-]

C_i obsah uhlíku v tuhých zbytcích [-]

i_i entalpie tuhých zbytků [$kJ \cdot kg^{-1}$]

13.2.5. Ztráta citelným teplem spalin

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_{sp} - I_{vz}}{Q_i^r} = (1 - Z_c) \cdot \frac{V_{sp} \cdot c_{sp} \cdot (t_{sp} - t_v)}{Q_i^r} \quad [-] \quad (13.8)$$

kde:

Z_k ztráta citelným teplem spalin [-]

Z_c ztráta mechanickým nedopalem [-]

I_{sp} entalpie spalin [kJ · kg⁻¹]

I_{vz} entalpie vzduchu [kJ · kg⁻¹]

Q_i^r výhřevnost paliva [kJ · kg⁻¹]

V_{sp} celkový objem spalin [m³ · kg⁻¹]

c_{sp} měrná tepelná kapacita spalin [kJ · kg⁻¹ · K⁻¹]

t_{sp} teplota spalin [°C]

t_v teplota okolí [°C]

14. Výpočet účinnosti kotle 1 pro agropalivo 1

14.1. Vstupní hodnoty pro výpočet

$\dot{V}_v = 1,16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	objemový průtok vody
$t_2 = 74,71 \text{ }^\circ\text{C}$	teplota vody na výstupu z kotle
$t_1 = 59,67 \text{ }^\circ\text{C}$	teplota vody na vstupu do kotle
$c_p = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita vody
$Q_i^r = 15\,410 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	výhřevnost agropaliva 1
$\rho = 978,76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota vody
$M_{pv} = 0,00138 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$	hmotnostní průtok paliva
$t_{sp} = 101 \text{ }^\circ\text{C}$	teplota spalin za kotlem
$t_v = 22,3 \text{ }^\circ\text{C}$	teplota okolí
$\text{NO}_x = 484,561 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$	průměrná hodnota NO_x (258,582 ppm)
$\text{CO} = 42,113 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$	průměrná hodnota CO (24,028 ppm)
$\text{O}_2 = 9,011 \text{ } \%$	průměrná hodnota O_2
$c_{sp} = 1,022 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita spalin
$v_{sp} = 0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost spalin v potrubí
$d = 160 \text{ mm}$	průměr potrubí
$R_h = 12,9 \text{ } \%$	relativní vlhkost
$\dot{V}_{sp} = 0,0421 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	objemový průtok spalin
$t = 30 \text{ min}$	doba měření

14.2. Rozbor agropaliva 1

$C^r = 43,29 \text{ hm} \%$
$H^r = 5,93 \text{ hm} \%$
$N^r = 0,65 \text{ hm} \%$
$O^r = 35,88 \text{ hm} \%$
$A^r = 9,299 \text{ hm} \%$

14.3. Výpočet přímou metodou

$$M_w = \frac{V_v \cdot \rho}{3600} = \frac{1,16 \cdot 978,76}{3600} = 0,315 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$I_{w2} = t_2 \cdot c_p = (273,15 + 74,71) \cdot 4,18 = 1454,05 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$I_{w1} = t_1 \cdot c_p = (273,15 + 59,67) \cdot 4,18 = 1391,19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\eta_k = \frac{M_w \cdot (i_{w2} - i_{w1})}{Q_i^r \cdot M_{pv}}$$

$$\eta_k = \frac{0,315 \cdot (1454,05 - 1391,19)}{15410 \cdot 0,00138} \cdot 100$$

$$\eta_k = 93,1 \%$$

14.4. Výpočet nepřímou metodou

14.4.1. Ztráta mechanickým nedopalem

Hodnota obsahu uhlíku v uvažovaném druhu tuhých zbytků ($C_r = 0,002$) byla stanovena vedoucím práce. Ostatní hodnoty jsou pro výpočet zanedbatelné, protože jsou velmi malé, kromě hodnoty podílu hmotnosti popele v uvažovaném druhu tuhých zbytků ($X_r = 1$)

$$Z_c = \frac{C_r}{1 - C_r} \cdot X_r \cdot \frac{A^r}{Q_i^r} \cdot Q_c$$

$$Z_c = \frac{0,002}{1 - 0,002} \cdot 1 \cdot \frac{0,09299}{15410} \cdot 32600$$

$$Z_c = 0,00039385$$

14.4.2. Ztráta chemickým nedopalem

V tomto výpočtu se zahrnuje pouze vliv objemového podílu oxidu uhelnatého (ω_{CO}), z důvodu nulové hodnoty objemového podílu vodíku (ω_{H_2}) a zanedbatelné hodnoty organických látek, přibližně 1 ppm.

$$Z_{CO} = (1 - Z_c) \cdot \frac{V_{ss} \cdot (\omega_{CO} \cdot Q_{CO}^r + \omega_{H_2} \cdot Q_{H_2}^r + \omega_{CH_4} \cdot Q_{CH_4}^r)}{Q_i^r}$$

$$Q_{CO}^r = 12610 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\omega_{CO} = 0,024028 \%$$

$$V_{sp} = \dot{V}_{sp} \cdot t = 0,0421 \cdot 1800 = 7,238 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$V_{ss} = V_{sp} - V_{sp} \cdot R_h = 7,238 - 7,238 \cdot 0,0129 = 6,304 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Z_{co} = (1 - 0,00039385) \cdot \frac{6,304 \cdot (0,00024028 \cdot 12610)}{15410}$$

$$Z_{co} = 0,01239$$

14.4.3. Ztráta sáláním a vedením tepla

Ztráta sáláním a vedením tepla byla určena dle výpočtu strojírenského zkušebního ústavu pro stejný typ kotle (kotel 1). Jako zkušební palivo byly použity dřevní pelety.

$$Z_{sv} = 0,014$$

14.4.4. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků je při spalování tuhých paliv nulová, protože všechny popel zůstává v popelníku a teplo od tuhých zbytků zůstává uvnitř kotle.

14.4.5. Ztráta citelným teplem spalin

Měrná tepelná kapacita spalin ($c_{sp} = 1,022 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) byla stanovena vedoucím práce.

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_{sp} - I_{vz}}{Q_i^r} = (1 - Z_c) \cdot \frac{V_{sp} \cdot c_{sp} \cdot (t_{sp} - t_v)}{Q_i^r}$$

$$V_{sp} = 7,238 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$Z_k = (1 - 0,00039385) \cdot \frac{7,238 \cdot 1,022 \cdot (101 - 22,3)}{15410}$$

$$Z_k = 0,03776$$

14.4.6. Účinnost kotle nepřímou metodou

$$\eta_k = (1 - \sum Z_c - Z_{co} - Z_{sv} - Z_f - Z_k) \cdot 100$$

$$\eta_k = (1 - 0,00039385 - 0,01239 - 0,014 - 0 - 0,03776) \cdot 100$$

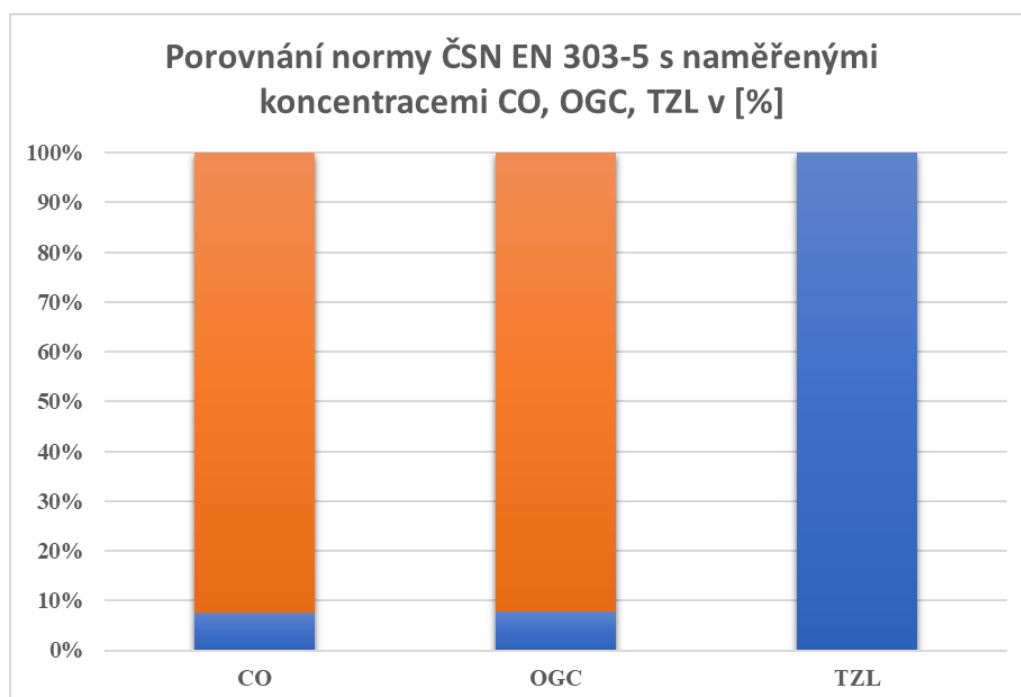
$$\eta_k = 93,54 \%$$

15. Závěr

Úvodní část práce stručně popisuje zdroje tepla pro vytápění, vlastnosti a rozdělení paliv, biomasu jako zdroj energie, typy kotlů a legislativní požadavky na jejich provoz.

Na legislativní požadavky se nahlíží jako na celek, přičemž nejprísněji je brána tvorba tuhých a plyných znečišťujících látek. Nejdůležitější normy a předpisy, se kterými se porovnávají výsledky práce je norma ČSN EN 303-5 a směrnice Evropského parlamentu a rady 2009/125/ES na Ekodesign kotlů na tuhá paliva, přičemž tato směrnice prozatím neplatí pro nedřevní biomasu.

Porovnání normy ČSN EN 303-5 se stanovenými koncentracemi CO, OGC a TZL pro měření 1 u agropaliva 1 (graf 13), kde jsou limitní hodnoty této normy brány jako 100 % a stanovené koncentrace pak dopočítány jako části celku limitních hodnot, tj. pro CO $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ je 100 %, pro OGC $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ je 100 % a pro TZL $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ je 100 %. Stanovené koncentrace CO a OGC spadají pod hranici 10 %. Výsledky měření koncentrací CO a OGC nepřekračují limitní hodnoty normy ČSN EN 303-5 a vyhověly tak jejím požadavkům. Naopak stanovená koncentrace TZL tuto limitní hodnotu překračuje, a to o více než 25 % (graf 13). Kotel 1 tak při spalování agropaliva 1 nesplnil pouze 1 parametr normy ČSN EN 303-5 pro kotle třídy 5, a to koncentraci TZL.



Graf 13: Porovnání normy ČSN EN 303-5 se stanovenými koncentracemi CO, OGC, TZL u agropaliva 1

Při porovnání agropaliva 1 s dřevními peletami dosahuje oxid uhelnatý nižších hodnot u agropaliva 1, a to o 48 % při prvním měření, o 16 % při měření druhém, oproti spalování dřevních pelet. Pro obě paliva tak koncentrace oxidu uhelnatého splňuje normu ČSN EN 303-5 pro kotle třídy 5. Pro dřevní pelety pak i směrnici o Ekodesignu. Koncentrace NO_x u agropaliva 1 narostla o více jak 200 %, oproti spalování dřevních pelet, přičemž limitní hodnota koncentrace NO_x se vyskytuje pouze ve směrnici o Ekodesignu, která neplatí pro agropalivo 1, a tak lze tento výsledek zanedbat. Pro dřevní pelety pak koncentrace NO_x nepřekračuje limitní hodnotu směrnice o Ekodesignu. Kyslík u agropaliva 1 oproti dřevním peletám narostl o 22 % v prvním měření, o 3 % v měření druhém, což je minimální rozdíl. Koncentrace TZL u agropaliva 1 oproti dřevním peletám v prvním měření klesla o 17 % z důvodu nedoladění kotle 1 na nejlepší možné hodnoty. V měření druhém naopak narostla o 61 % oproti spalování dřevních pelet, kde byl kotel 1 vyladěn na nejlepší možné hodnoty. Celkově koncentrace TZL u agropaliva 1 překračuje limitní hodnotu pro kotle nejvyšší třídy dle normy ČSN EN 303-5 a i při velmi nízké koncentraci OGC a CO spadá kotel 1 do třídy číslo 4. Směrnice o Ekodesignu pro agropalivo 1 zatím není v platnosti, jak již bylo zmíněno v kapitole 9.3.

Účinnost kotle 1 vypočtená přímou metodou je 93,1 % a metodou nepřímou pak 93,54 %, což je o 1,04 % více než garantuje výrobce. To mohlo být způsobeno různými úpravami kotle, jako je posun hořáku či umístění přepážky. Garantovaná účinnost výrobce byla počítána bez těchto úprav, a proto se hodnoty můžou mírně lišit. Vypočtenou účinnost nepřímou metodou pro kotel 1 lze tak považovat za efektivní.

Seznam použitých zdrojů

- [1] RICHTEROVÁ, Martina. Jaké způsoby vytápění existují?. Stavební vzdělání [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.stavebni-vzdelani.cz/vytapeni-rodinnych-domu/>
- [2] BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [3] LULKOVIČOVÁ, Otilia, Dušan PETRÁŠ, Jiří BAŠTA, Vladimír JELÍNEK a Viktor KABÁT. Zdroje tepla a domovní kotelny. Bratislava: Jaga group, 2004. ISBN 80-8076-002-0.
- [4] NOVÁČEK, Pavel. Udržitelný rozvoj. Olomouc: Univerzita Palackého Olomouc, 2010. ISBN 978-80-244-2514-6.
- [5] BALÁŠ, Marek, Jiří MOSKALÍK a Martin LISÝ. Kotle - 1. část. Tzb-info [online]. 2012, 19.3.2012 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>
- [6] JAFFE, Robert L. a Washington TAYLOR. The physics of energy. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. ISBN 978-1-107-01665-1.
- [7] Zpracování ropy. Petroleum [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/>
- [8] RYBÍN, Miroslav. Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů. Praha: nakladatelství technické literatury, 1978. ISBN 04-230-78.
- [9] DINCER, Ibrahim. Comprehensive energy systems. Oshawa, Kanada: University of Ontario Institute of Technology, 2018. ISBN 978-0-12-809597-3.
- [10] GAURAV, N., S. SIVASANKARI, GS KIRAN, A. NINAWA a J. SELVIN. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2017, 73, 205-214 [cit. 2019-03-06]. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.070. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117300801>
- [11] JANÍČEK, František. Biomasa ako palivo [online]. 30.1.2009 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-ako-palivo>

- [12] ENAGI, Ibrahim I., K.A. AL-ATTAB a Z.A. ZAINAL. Liquid biofuels utilization for gas turbines: A review [online]. , 43-55 [cit. 2019-05-07]. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.006. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118300960>
- [13] BONASSA, Gabriela, Lara Talita SCHNEIDER, Victor Bruno CANEVER, Paulo André CREMONEZ, Elisandro Pires FRIGO, Jonathan DIETER a Joel Gustavo TELEKEN. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, 82, 2365-2378 [cit. 2019-03-06]. DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.075. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117312200>
- [14] GLUSHKOV, Dmitrii, Kristina PAUSHKINA, Dmitrii SHABARDIN, Pavel STRIZHAK a Nadezhda GUTAREVA. Municipal solid waste recycling by burning it as part of composite fuel with energy generation. *Journal of Environmental Management* [online]. 2019, 231, 896-904 [cit. 2019-03-19]. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.067. ISSN 03014797. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479718312015>
- [15] JUCHELKOVÁ, Dagmar, KOPPE, Klaus: Odpady, vedlejší produkty nebo alternativní paliva?. *Biom.cz* [online]. 2002-01-15 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/odpady-vedlejsi-produkty-nebo-alternativni-paliva>>. ISSN: 1801-2655.
- [16] Statistika energetického využívání odpadů a alternativních paliv 1989–2017. Česká asociace odpadového hospodářství [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2018 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <http://www.caoh.cz/data/action/statistika-energetickeho-vyuzivani-odpadu-a-alternativnich-paliv-1989-2017.pdf>
- [17] BALÁŠ, Marek, Zdeněk SKÁLA a Martin LISÝ. Spalovny odpadu - odpad jako palivo. *Tzb-info* [online]. 2014, 27.10.2014 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/nakladani-s-odpady/11897-spalovny-odpadu-odpad-jako-palivo>

- [18] KOLONIČNÝ, Jan, Jiří HORÁK a Silvie PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ. Kotle malých výkonů na pevná paliva. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2542-7.
- [19] LYČKA, Zdeněk. Malé teplovodní kotle na pevná paliva: spalování pevných paliv po roce 2013. Krnov: LING vydavatelství, 2012. ISBN 978-80-904914-2-7.
- [20] NOVÁK, Jan. Výhřevnosti paliv. Tzb-info [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>
- [21] HORÁK, Jiří, Kamil KRPEC, Lubomír MARTINÍK, Lenka MICHNOVÁ, František HOPAN a Petr KUBESA. Jak si doma stanovit vlhkost a výhřevnost dřeva?. Tzb-info [online]. 2012, 19.11.2012 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/9300-jak-si-doma-stanovit-vlhkost-a-vyhrevnost-dreva>
- [22] HORÁK, Jiří a Petr KUBESA. O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích. Tzb-info [online]. 2012 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [23] PATOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. Biomasa obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC PUBLIC, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [24] KUČERA, Zdeněk a Vladimír STUPAVSKÝ. Biomasa = energetická, ekologická, ekonomická. Praha: CEMC, 2010. ISBN 978-80-85990-17-1.
- [25] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.
- [26] České peletárny lisují od rána do noci, vyrobí až 200 tisíc tun dřevěných pelet ročně. Tzb-info [online]. 2013, 29.3.2013 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/peletky/9713-ceske-peletarny-lisuji-od-rana-do-noci-vyrobi-az-200-tisic-tun-drevenych-pelet-rocne>
- [27] Kvalitní dřevěné brikety. Paliva Zdemar [online]. 2014, 22.9.2014 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.palivazdemar.cz/novinky/kvalitni-drevene-brikety-vysoka-vyhrevnost>

- [28] STUPAVSKÝ, Vladimír. Pelety a automatické kotle - popis trhu ke konci roku 2013. Tzb-info [online]. 2013, 25.11.2013 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/peletky/10627-pelety-a-automaticke-kotle-popis-trhu-ke-konci-roku-2013>
- [29] MALAŤÁK, Jan, Petr JEVIČ a Petr VACULÍK. Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. Praha: powerprint, 2010. ISBN 978-80-87415-02-3.
- [30] Biomasa: Co je dobré vědět, než ji začneme spalovat. Nazeleno [online]. 2010, 29.6.2010 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/vytapeni-1/biomasa/biomasa-co-je-dobre-vedet-nez-ji-zacneme-spalovat.aspx>
- [31] Dřevěné pelety mají další plus. Certifikát ENplus ručí za jejich kvalitu, trhu to prospěje. Tzb-info [online]. 2013, 12.4.2013 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/peletky/9758-drevene-pelety-maji-dalsi-plus-certifikat-enplus-ruci-za-jejich-kvalitu-trhu-to-prospeje>
- [32] České pelety v kvalitě dohánějí Německo, díky certifikaci ENplus. Tzb-info [online]. 2013, 15.10.2013 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/peletky/10457-ceske-pelety-v-kvalite-dohaneji-nemecko-diky-certifikaci-enplus>
- [33] TRÁVNÍČEK, Petr, Ivan VITÁZEK, Tomáš VÍTĚZ, Luboš KOTEK a Petr JUNGA. Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. Brno: Mendelova univerzita, 2015. ISBN 978-80-7509-206-9.
- [34] VERNER, Vladimír. Alternativní pelety. Biom [online]. Biom, 2007, 31.12.2007 [cit. 2019-04-18]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/alternativni-pelety>
- [35] BUFKA, Aleš. Brikety a pelety v roce 2011. Tzb-info [online]. 2013, 1.4.2013 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/peletky/9721-brikety-a-pelety-v-roce-2011>
- [36] Firemní stránky firmy EKOVER [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.ekover.cz>

- [37] PETŘÍKOVÁ, Vlasta. Rostliny pro energetické účely. Biom [online]. Praha: česká energetická agentura [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/rostliny-pro-energetick-ely.pdf>
- [38] ČSN 07 0240 (070240). Teplovodní a nízkotlaké parní kotle – Základní ustanovení. Praha: český normalizační institut, 1993.
- [39] ČSN EN 303-5 (075303). Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 300 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [40] LYČKA, Zdeněk. Základní pojmy a definice k tématu teplovodní kotle na pevná paliva. Tzb-info [online]. 2013, 15.4.2013 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9767-zakladni-pojmy-a-definice-k-tematu-teplovodni-kotle-na-pevna-paliva>
- [41] RYŠAVÝ, Jiří, Jiří HORÁK, František HOPAN, Kamil KRPEC, Petr KUBESA a Jiří KREMER. Komfort kotlů na tuhá/pevná paliva – část I.: Jak dlouho vydrží teplo z jednoho přiložení či nabitě akumulární nádoby?. Tzb-info [online]. 2018, 26.3.2018 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/17137-komfort-kotlu-na-tuha-pevna-paliva-cast-i>
- [42] VALČÍK, Jan. Porovnání hořáků pro automatické kotle. Tzb-info [online]. 2014, 8.10.2014 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11812-porovnani-horaku-pro-automaticke-kotle>
- [43] STRUPAVSKÝ, Vladimír. Nové kotle na tuhá paliva a jejich připravenost na podmínky legislativy a dotací. Tzb-info [online]. 2015, 19.3.2015 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/12450-nove-kotle-na-tuha-paliva-a-jejich-pripravenost-na-podminky-legislativy-a-dotaci>
- [44] Firemní stránky Kovarson: Univerzální samočisticí hořák. Kovarson [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.kovarson.cz/cs/univerzalni-horaky-samocistici-c3/univerzalni-horak-25-kw-samocistici-p16>

- [45] Firemní stránky Kovarson: Porovnání hořáků pro automatické kotle. Kovarson [online]. 2014, 8.10.2014 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.kovarson.cz/cs/porovnani-horaku-pro-automaticke-kotle-a14#>
- [46] Firemní stránky Kovarson: Retortový hořák. Kovarson [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.kovarson.cz/cs/retortove-horaky-c4/retortovy-horak-25-kw-p15>
- [47] Firemní stránky Kovarson: Univerzální čtvercový hořák. Kovarson [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.kovarson.cz/cs/univerzalni-horaky-c2/univerzalni-horak-6-27-kw-p20>
- [48] PONAŠT ve spolupráci s VERNER SK vyvinul nový kotel na spalování alternativních pelet. Česká peleta [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.ceska-peleta.cz/clanky-klastu/ponast-vyvinul-novy-kotel-na-spalovani-alternativnich-pelet/>
- [49] Hořáky blaze harmony. Blazeharmony [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://www.blazeharmony.com/files/blazeharmony/files/horaky-blaze-harmony.cz.pdf>
- [50] Hořák s rotační spalovací komorou Blaze Harmony. Česká peleta [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.ceska-peleta.cz/clanky-klastu/horak-s-rotacni-spalovaci-komorou-blaze-harmony/>
- [51] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší. In: . 2012, 201/2012.
- [52] STUPAVSKÝ, Vladimír. Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva. Tzb-info [online]. 2014, 6.11.2014 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>
- [53] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES: Požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva. In: . Evropská unie, 2015.

- [54] KUBESA, Petr, Jiří HORÁK, Kamil KRPEC, František HOPAN, Zuzana JANKOVSKÁ a Lubomír MARTINÍK. Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení. Tzb-info [online]. 2013, 4.2.2013 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>
- [55] DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 2007. ISBN 978-80-01-03757-7.

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Vysušování dřeva a průběh snižování vlhkosti [21].....	36
Obrázek 2: Peletovací linka na výrobu dřevěných pelet [26]	43
Obrázek 3: Dřevěné brikety [27].....	44
Obrázek 4: Pelety z biomasy [30]	44
Obrázek 5: Dřevní pelety [32].....	45
Obrázek 6: Základní konstrukční části kotle [40]	51
Obrázek 7: Schéma kotle na tuhá paliva [40]	52
Obrázek 8: Prohořivací kotel [41].....	53
Obrázek 9: Odhořivací kotel [41].....	53
Obrázek 10: Zplyňovací kotel [41]	54
Obrázek 11: Automatický kotel [41].....	54
Obrázek 12: Univerzální samočisticí hořák [42].....	55
Obrázek 13: Retortový hořák [42]	56
Obrázek 14: Univerzální čtvercový hořák [42].....	57
Obrázek 15: Hořák s pohyblivými deskami [48]	57
Obrázek 16: Hořák s rotační komorou [50]	58
Obrázek 17: Kotel 1 s přepážkou a vysunutým hořákem z čelní strany (vlevo), kotel 1 bez přepážky a hořákem z boční strany (vpravo).....	63
Obrázek 18: Schéma přímého odběru vzorku spalín z kouřovodu gravimetrickou metodou [54]	64
Obrázek 19: Odběrové trasy, měření TZL (1), měření OGC (2), měření plynných znečišťujících látek (3).....	65
Obrázek 20: Objemový průtokoměr (1), kondenzátor (2), vývěva (3)	65
Obrázek 21: Ukázka měření pomocí počítače v řídicím centru	66
Obrázek 22: Siemens ultramat 23 (vlevo), Testa FID 2010 T (vpravo)	66
Obrázek 23: Sušička Venticell LSIK/VC111 (vlevo), Exsikátor (vpravo).....	67

Obrázek 24: Laboratorní váha Ohaus EP114C (vlevo), filtr s miskou použitý při měření (vpravo).....	67
Obrázek 25: Palivo použité při měření (vlevo), filtr s odebraným vzorkem (vpravo) ..	68
Obrázek 26: Tvorba spečence a jazyku na konci hořáku (vlevo), ukázka spečence (vpravo).....	71

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Rozdělení paliv dle skupenství [3]	25
Tabulka 2: Rozdělení paliv dle původu [3]	25
Tabulka 3: Rozbor vybraných druhů tuhých paliv [2], [22]	40
Tabulka 4: Limitní hodnoty parametrů pro dřevní pelety dle ENplus [31]	46
Tabulka 5: Licenční paliva EKOVER a jejich složení [36]	47
Tabulka 6: Průměrné fyzikální a chemické vlastnosti paliv EKOVER [36].....	48
Tabulka 7: Minimální emisní požadavky na spalovací stacionární zdroje na pevná paliva [51]	60
Tabulka 8: Znečišťující látky, které podléhají zpoplatnění a poplatkům za znečišťování v jednotlivých letech (Kč/t) [51]	60
Tabulka 9: Mezní hodnoty emisí [39]	61
Tabulka 10: Povinnosti související s prodejem a provozem kotlů na tuhá paliva [52], [53]	62
Tabulka 11: Hodnoty emisních limitů pro kotle na tuhá paliva [52], [53].....	62
Tabulka 12: Štítek s parametry kotle 1	64
Tabulka 13: Časy odběrů a nastavení kotle při průběhu měření 1	70
Tabulka 14: Koncentrace tuhých a plyných znečišťujících látek, měření 1	70
Tabulka 15: Časy odběrů a nastavení kotle při průběhu měření 2	72
Tabulka 16: Koncentrace tuhých a plyných znečišťujících látek, měření 2	72
Tabulka 17: Srovnání průměrných naměřených koncentrací tuhých a plyných znečišťujících látek, měření 1	75
Tabulka 18: Srovnání průměrných naměřených koncentrací tuhých a plyných znečišťujících látek.....	77
Tabulka 19: Porovnání dřevních pelet a agropaliva 1 s normou ČSN EN 303-5 pro měření 1	78
Tabulka 20: Porovnání dřevních pelet a agropaliva 1 s normou o Ekodesignu pro měření 1	78

Tabulka 21: Porovnání dřevních pelet a agropaliva 1 s normou ČSN EN 303-5 pro měření 2	79
Tabulka 22: Porovnání dřevních pelet a agropaliva 1 s normou o Ekodesignu pro měření 2	79

Seznam použitých grafů

Graf 1: Světová spotřeba energie palivem v roce 2014 [6]	29
Graf 2: Přibližné složení komunálního odpadu v ČR [17]	31
Graf 3: Prvkové složení hořlaviny vybraných paliv [18]	32
Graf 4: Výhřevnost vybraných tuhých paliv [2], [18], [22]	39
Graf 5: Závislost CO, NO _x a O ₂ na čase pro agropalivo 1 při průběhu odběrů, měření 1	69
Graf 6: Závislost CO, NO _x a O ₂ na čase pro agropalivo 1 při průběhu odběrů, měření 2	71
Graf 7: Srovnání naměřených koncentrací CO pro dřevní pelety a agropalivo 1, měření 1	73
Graf 8: Srovnání naměřených koncentrací NO _x pro dřevní pelety a agropalivo 1, měření 1	74
Graf 9: Srovnání naměřených koncentrací O ₂ pro dřevní pelety a agropalivo 1, měření 1	74
Graf 10: Srovnání naměřených koncentrací CO pro dřevní pelety a agropalivo 1, měření 2	76
Graf 11: Srovnání naměřených koncentrací NOX pro dřevní pelety a agropalivo 1, měření 2	76
Graf 12: Srovnání naměřených koncentrací O ₂ pro dřevěné pelety a agropalivo 1	77
Graf 13: Porovnání normy ČSN EN 303-5 se stanovenými koncentracemi CO, OGC, TZL u agropaliva 1	87

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
h	hořlavina v palivu	—, %
A	popelovina v palivu	—, %
W	voda v palivu	—, %
Q_i	výhřevnost paliva	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Q_s	spalné teplo	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
C	uhlík v palivu	$\text{kg}, \%$
H_2	vodík v palivu	$\text{kg}, \%$
S	síra v palivu	$\text{kg}, \%, \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
O_2	kyslík v palivu	$\text{kg}, \%$
N_2	dusík v palivu	$\text{kg}, \%$
r	výparné teplo vody	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Q_{in}	výhřevnost dílčího paliva	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
m_n	hmotnost dílčího paliva	kg
p	tlak	Pa
A^d	obsah popela v suchém palivu	%
V^{daf}	prchavá hořlavina v palivu	%
t_A	teplota počátku měknutí	$^{\circ}\text{C}$
t_B	teplota tání	$^{\circ}\text{C}$
t_C	teplota počátku tečení	$^{\circ}\text{C}$
V	vodní hodnota kalorimetru	$\text{MJ} \cdot \text{K}^{-1}$
G	hmotnost paliva pro spalné teplo	kg
\bar{S}	poměrný obsah síry v palivu	$\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$
CO	oxid uhelnatý	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
NO_x	oxid dusíku	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
OGC	celkový organický uhlík	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

TZL	tuhé znečišťující látky	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
η_k	účinnost kotle	%
Q	tepelný výkon kotle	kW
X_{ref}	referenční hodnota	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
X_{real}	naměřená hodnota	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
$O_{2\text{ref}}$	referenční hodnota kyslíku	%
$O_{2\text{real}}$	naměřená hodnota kyslíku	%
T	teplota	K
M_w	hmotnostní tok vody kotlem	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
M_{pv}	hmotnostní tok dodávaného paliva	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
i_{w2}	entalpie ohřáté vody na výstupu z kotle	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
i_{w1}	entalpie ohřáté vody na vstupu do kotle	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Z_c	ztráta mechanickým nedopalem	—
Z_{co}	ztráta chemickým nedopalem	—
Z_{sv}	ztráta sáláním a vedením tepla do okolí	—
Z_f	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	—
Z_k	ztráta citelným teplem spalín	—
Z_{cs}	ztráta nedopalem v popílku	—
$Z_{\text{cú}}$	ztráta nedopalem v úletu	—
Z_{cr}	ztráta nedopalem v roštovém propadu	—
Z_{cb}	ztráta uhelným práškem v brýdách	—
Z_{ci}	ztráta v uvažovaném druhu tuhých zbytků	—
C_i	obsah uhlíku v uvažovaném druhu tuhých zbytků	—
X_i	podíl hmotnosti popele v uvažovaném druhu tuhých zbytků	—
Q_{ci}	průměrná hodnota výhřevnosti	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

V_{ss}	objem suchých spalín na 1kg paliva	$m^3 \cdot kg^{-1}$
ω_i	objemový podíl nespáleného plynu	—
Λ_H	součinitel přestupu tepla z vnějšího vodorovného povrchu kotle do okolního prostředí	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
S_{Hi}	plošný obsah vnějšího vodorovného povrchu kotle	m^2
t_i	průměrná teplota vnějšího povrchu kotle	$^{\circ}C$
t_m, t_v	teplota okolního prostředí	$^{\circ}C$
Λ_V	součinitel přestupu tepla z vnějšího svislého povrchu kotle do okolního prostředí	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
S_{Vi}	plošný obsah vnějšího svislého povrchu kotle	m^2
P_p	tepelný příkon kotle	W
i_i	entalpie tuhých zbytků	$kJ \cdot kg^{-1}$
I_{sp}	entalpie vzduchu	$kJ \cdot kg^{-1}$
I_{vz}	entalpie vzduchu	$kJ \cdot kg^{-1}$
V_{sp}	celkový objem spalín	$m^3 \cdot kg^{-1}$
c_{sp}	měrná tepelná kapacita spalín	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
t_{sp}	teplota spalín	$^{\circ}C$
\dot{V}_v	objemový průtok vody	$m^3 \cdot h^{-1}$
t_2	teplota vody na výstupu z kotle	$^{\circ}C$
t_1	teplota vody na vstupu do kotle	$^{\circ}C$
c_p	měrná tepelná kapacita vody	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ	hustota	$kg \cdot m^{-3}$
M_{pv}	hmotnostní průtok paliva	$kg \cdot s^{-1}$
d	průměr potrubí	mm
R_h	relativní vlhkost	%
\dot{V}_{sp}	objemový průtok spalín	$m^3 \cdot s^{-1}$
t	doba měření	min

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
např.	například
tj.	to je
ELTO	extra lehké topné oleje
LTO	lehké topné oleje
TTO	těžké topné oleje
C/H	poměr uhlíku a vodíku
ČR	Česká republika